



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής
και Αγροτικού Περιβάλλοντος**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Αυτοματισμοί στις Αρδεύσεις, τις Γεωργικές Κατασκευές
και στην Εκμηχάνιση της Γεωργίας**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**“Ευφυής Έλεγχος με Ασαφή Λογική για τον
Αυτοματισμό ενός Συστήματος Άρδευσης”**

Νικόλαος Οικονόμου

Βόλος, 2016

"Ευφυής Έλεγχος με Ασαφή Λογική για τον Αυτοματισμό ενός Συστήματος Άρδευσης"

"Fuzzy Logic Based Intelligent Control for Automation of an Irrigation System"

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

1. Ηρακλής Χαλκίδης, *Επιβλέπων*.

Λέκτορας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

2. Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, *Μέλος*.

Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

3. Ανθούλα Δημήρκου, *Μέλος*.

Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Ηρακλή Χαλκίδη, τόσο για την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της μελέτης όσο και για την επιρροή που άσκησε πάνω μου στην επιλογή του θέματος.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγήτριες κ.κ. Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη και Ανθούλα Δημήρκου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Οφείλω ευχαριστίες στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Κατσούλα που μου υπέδειξε τη μεθοδολογία μοντελοποίησης φυσικών συστημάτων στο MATLAB.

Επίσης, ευχαριστώ τον Λέκτορα (ΠΔ 407/80) κ. Χρήστο Παπανικολάου για τη βοήθειά του στον τελικό έλεγχο της εργασίας και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις του.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Κώστα και Γιάννα και στον αδερφό μου Μάνο, για την αγάπη και την ολόψυχη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Το νερό είναι ένας περιορισμένος φυσικός πόρος και η διαθεσιμότητά του συνιστά μία από τις θεμελιώδεις προϋποθέσεις για τη ζωή στη Γη. Ένας από τους βασικότερους καταναλωτές του νερού παγκοσμίως είναι η αρδευόμενη γεωργία. Η ανάγκη για την αειφόρο διαχείριση του νερού στην αρδευόμενη γεωργία διαρκώς μεγαλώνει, εμπλέκοντας νέες τεχνικές ευφυούς αυτομάτου ελέγχου οι οποίες συμβάλουν στην εξοικονόμηση του νερού. Σε αυτή τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των πρακτικών και του προγραμματισμού των αρδεύσεων και οι βασικοί τρόποι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, και ιδιαιτέρως της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, σύμφωνα με την εξίσωση των Penman-Monteith. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τόσο συμβατικά όσο και ευφυή συστήματα ελέγχου άρδευσης με ιδιαίτερη έμφαση στις βασικές αρχές της θεωρίας του ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική και παραδείγματα εφαρμογών και των δύο τύπων. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η προσομοίωση ενός τύπου Mamdani συστήματος ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική, χρησιμοποιώντας το Simulink και την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB, το οποίο αποτελείται από έναν ασαφή ελεγκτή PD με πρόσθια τροφοδότηση με εισόδους το σφάλμα και τη μεταβολή του σφάλματος και έξοδο τον χρόνο άρδευσης. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, η τιμή της οποίας αφαιρείται από την επιθυμητή τιμή εξατμισοδιαπνοής υπολογίζοντας το σφάλμα. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος, καθώς ο χρόνος άρδευσης και κατ' επέκταση η ποσότητα του νερού άρδευσης μεταβάλλονται με ακρίβεια σύμφωνα με την ημερήσια τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: Ασαφής λογική, ασαφής ελεγκτής, ευφυής έλεγχος, αυτοματισμός άρδευσης, Simulink, MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox, άρδευση, εξατμισοδιαπνοή, διαχείριση υδατικών πόρων, προγραμματισμός αρδεύσεων, επιφανειακή άρδευση.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Διαχείριση του νερού	3
2.1. Αειφόρος διαχείριση του νερού στη γεωργία	3
2.1.1. Δυνατότητα εξοικονόμησης νερού	3
2.1.2. Στρατηγικές εξοικονόμησης νερού	5
2.2. Η άρδευση των καλλιεργειών	6
2.3. Το διαθέσιμο εδαφικό νερό στις καλλιέργειες	7
2.3.1. Εδαφική υγρασία	7
2.3.2. Προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας	8
2.3.3. Συνθήκες υγρασίας του εδάφους	10
2.3.3.1. Υδατοϊκανότητα του εδάφους	11
2.3.3.2. Σημείο μόνιμης μάρανσης	11
2.3.3.3. Διαθέσιμη και ωφέλιμη υγρασία.....	11
2.4. Κατανάλωση νερού από τις καλλιέργειες.....	11
2.4.1. Διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής	12
2.4.1.1. Εξάτμιση.....	12
2.4.1.2. Διαπνοή.....	13
2.4.1.3. Εξατμισοδιαπνοή (ET).....	13
2.4.2. Φυτικοί παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό της εξατμισοδιαπνοής	14
2.4.2.1. Το είδος του φυτού	14
2.4.2.2. Η ανακλαστικότητα του φυλλώματος.....	14
2.4.2.3. Το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από το φύλλωμα	15
2.4.2.4. Το ύψος των φυτών.....	15
2.4.2.5. Το βάθος και η πυκνότητα του ριζικού συστήματος.....	15
2.4.2.6. Το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.....	15

2.4.3.	Κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή.	16
2.4.4.	Έμμεσες μικροκλιματικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής	16
2.4.5.	Έμμεσες εμπειρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής	17
2.4.6.	Μέθοδοι υπολογισμού της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ή εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας	18
2.4.7.	Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET ₀	20
2.4.7.1.	Τροποποιημένη μέθοδος των Blaney-Cridle	20
2.4.7.2.	Μέθοδος των Penman-Monteith	21
2.4.8.	Άμεσες μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής	22
2.5.	Απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό	22
2.5.1.	Προγραμματισμός των αρδεύσεων	23
2.6.	Μέθοδοι άρδευσης	25
2.6.1.	Επιφανειακή άρδευση	25
2.6.1.1.	Κεκλιμένη άρδευση ή μέθοδος άρδευσης με ροή.	26
2.6.1.2.	Οριζόντια άρδευση ή μέθοδο άρδευσης με κατάκλιση.....	26
2.6.2.	Άρδευση με τεχνητή βροχή	26
2.6.3.	Άρδευση με σταγόνες	27
3.	Αυτόματος έλεγχος σε συστήματα άρδευσης	28
3.1.	Κλασικός αυτόματος έλεγχος.....	28
3.1.1.	Βασικές στρατηγικές αυτομάτου ελέγχου	29
3.1.1.1.	Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου	29
3.1.1.2.	Συστήματα αυτομάτου ελέγχου με πρόσθια-τροφοδότηση	31
3.1.1.3.	Συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου	32
3.1.2.	Προγραμματιστές άρδευσης	35
3.1.2.1.	Ηλεκτρομηχανικοί προγραμματιστές άρδευσης.....	35

3.1.2.2. Ηλεκτρονικοί προγραμματιστές άρδευσης.....	36
3.1.3. Αισθητήρες.....	37
3.1.4. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης που βασίζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή	39
3.1.4.1. Διαδραστικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης ...	39
3.1.4.2. Πλήρως αυτόματα συστήματα ελέγχου	40
3.1.5. Επιλογή ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου άρδευσης	42
3.1.6. Κεντρικός έλεγχος άρδευσης	42
3.1.7. Φιλοσοφίες αυτόματων συστημάτων άρδευσης.....	44
3.1.8. Νέες δυνατότητες συστημάτων ελέγχου άρδευσης.....	45
3.1.9. Λειτουργία των συστημάτων ελέγχου άρδευσης.....	45
3.1.10. Οικονομικά κριτήρια επιλογής συστημάτων ελέγχου άρδευσης	46
3.2. Ευφυής έλεγχος.....	47
3.2.1. Ευφυείς ελεγκτές.....	48
3.2.2. Τεχνικές του ευφυούς ελέγχου	49
3.2.2.1. Έμπειρα συστήματα	50
3.2.2.2. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	50
3.2.2.3. Ασαφής λογική	51
3.3. Ευφυής έλεγχος με ασαφή λογική	51
3.3.1. Ασαφή σύνολα.....	52
3.3.2. Βασικές ιδιότητες ασαφών συνόλων	54
3.3.2.1. Συναρτήσεις συμμετοχής.....	56
3.3.2.2. Πράξεις ασαφών συνόλων	62
3.3.2.3. Αλγεβρικές ιδιότητες ασαφών συνόλων.....	63
3.3.2.4. Λεκτικοί τροποποιητές ή όρια	64
3.3.2.5. Ασαφείς κανόνες	64
3.3.3. Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων	65

3.3.3.1. Δομή ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.....	66
3.3.3.2. Η περίπτωση του ασαφούς ελεγκτή PD	67
3.3.3.3. Τύποι ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων.....	71
4. Ανασκόπηση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου άρδευσης	77
4.1. Συμβατικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης.....	77
4.2. Ευφυή συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης	79
4.2.1.1. Ευφυής έλεγχος άρδευσης με ασαφή λογική.....	79
4.2.1.2. Ευφυής έλεγχος άρδευσης με νευρωνικά δίκτυα	84
5. Υλικά και μέθοδοι.....	86
5.1. Λογισμικό MATLAB	86
5.1.1. Simulink	87
5.1.2. Εργαλειοθήκη Ασαφούς Λογικής	91
5.2. Μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος στο MATLAB/Simulink.....	92
5.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος ευφυούς ελέγχου άρδευσης στο Simulink	92
5.2.1.1. Δεδομένα εισόδου	96
5.2.1.2. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o κατά Penman-Monteith	101
5.2.1.3. Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c	102
5.2.1.4. Κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T (Slope of saturation vapor pressure)	102
5.2.1.5. Πίεση κορεσμού υδρατμών στη μέγιστη θερμοκρασία αέρα T_{max} (Saturation vapor pressure at the maximum air temperature).....	103
5.2.1.6. Πίεση κορεσμού υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία αέρα T_{min} (Saturation vapor pressure at the maximum air temperature).....	104

5.2.1.7. Μέση πίεση κορεσμού υδρατμών (Mean saturation vapor pressure)	104
5.2.1.8. Πραγματική πίεση υδρατμών (Actual vapor pressure) ...	105
5.2.1.9. Έλλειμμα πίεσης υδρατμών (Vapor pressure deficit)	105
5.2.1.10. Ψυχομετρική σταθερά (Psychometric constant)	106
5.2.1.11. Ατμοσφαιρική πίεση (Atmospheric pressure)	106
5.2.1.12. Καθαρή ακτινοβολία (Net radiation).....	107
5.2.1.13. Καθαρή ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (Net solar radiation).....	108
5.2.1.14. Καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (Net longwave radiation)	108
5.2.1.15. Σταθερά Stephan - Boltzman (Stephan - Boltzman constant).....	110
5.2.1.16. Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού (Clear-sky solar radiation)	110
5.2.1.17. Εξωγήινη ακτινοβολία (Extraterrestrial radiation)	110
5.2.1.18. Αντίστροφη σχετική απόσταση μεταξύ γης και ήλιου (Inverse relative distance Earth-Sun)	112
5.2.1.19. Ηλιακή απόκλιση (Solar declination)	112
5.2.1.20. Γωνία ώρας δύσης του ήλιου (Sunset hour angle)	112
5.2.2. Μοντέλο του ασαφούς ελεγκτή στην εργαλειοθήκη Ασαφούς Λογικής του MATLAB.....	113
5.2.2.1. Καθορισμός βασικών στοιχείων του ασαφούς ελεγκτή...	113
5.2.2.2. Καθορισμός των υπερσυνόλων αναφοράς.....	115
5.2.2.3. Σύνταξη των ασαφών κανόνων	119
5.2.2.4. Παρακολούθηση κανόνων ελέγχου	121
5.2.2.5. Απεικόνιση της επιφάνειας ελέγχου.....	122
6. Αποτελέσματα και συζήτηση.....	124

6.1. Αποτελέσματα	124
6.2. Συζήτηση	128
7. Συμπεράσματα.....	130
8. Βιβλιογραφία.....	133

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 2.1. Στοιχεία της δεξαμενής νερού του εδάφους. Τροποποιημένη. Available at: http://croptechology.unl.edu/ [Accessed 28 Mar. 2016].	10
Εικόνα 2.2. Κύκλος του νερού στην επιφάνεια της Γης, παρουσιάζοντας ξεχωριστά τα συστατικά της διαπνοής και της εξάτμισης που αποτελούν την εξατμισοδιαπνοή. Τροποποιημένη. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Evapotranspiration [Accessed 28 Mar. 2016].	12
Εικόνα 2.3. Γενική καμπύλη μεταβολής του συντελεστή καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Allen et al., 1998, fig. 25).	19
Εικόνα 3.1. Σύστημα ανοιχτού βρόχου, χωρίς ανατροφοδότηση. Τροποποιημένη (Romero et al., 2012).	30
Εικόνα 3.2. Ελεγκτής άρδευσης ανοιχτού βρόχου. Τροποποιημένη (Zazueta et al., 2008, fig. 1).	31
Εικόνα 3.3. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου με πρόσθια-τροφοδότηση. Τροποποιημένη (Romero et al., 2012).	32
Εικόνα 3.4. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου. Τροποποιημένη (Romero et al., 2012).	32
Εικόνα 3.5. Ελεγκτής άρδευσης κλειστού βρόχου με αισθητήρα υγρασίας εδάφους. Τροποποιημένη (Zazueta et al., 2008, fig. 2).	33
Εικόνα 3.6 Ελεγκτής άρδευσης κλειστού βρόχου υψηλής συχνότητας. Τροποποιημένη (Zazueta et al., 2008, fig. 3).	34
Εικόνα 3.7. Ηλεκτρομηχανικός προγραμματιστής άρδευσης της εταιρείας Rain Bird (RC-Bi). Available at: http://www.rainbird.com/ [Accessed 28 Mar. 2016].	36
Εικόνα 3.8. Ηλεκτρονικός ελεγκτής άρδευσης της εταιρείας Rain Bird (SST- 900i) Available at: http://www.rainbird.com/ [Accessed 28 Mar. 2016].	36
Εικόνα 3.9. Τενσιόμετρο εξοπλισμένο με μετρητή πίεσης για την παροχή συνεχούς ανατροφοδότησης του δείκτη κατακράτησης νερού εδάφους (Boman et al., 2015, fig. 8).	37

Εικόνα 3.10. Τενσιόμετρο εξοπλισμένο με διακόπτη για την παροχή μιας διακριτής κατάστασης on/off της εδαφικής υγρασίας (Boman et al., 2015, fig. 11).....	38
Εικόνα 3.11. Πίνακας ελέγχου ενός κεντρικά ελεγχόμενου συστήματος άρδευσης εσπεριδοειδών: (Boman et al., 2015, fig. 14).....	41
Εικόνα 3.12. Δομή ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου με είσοδο μετεωρολογικού σταθμού για τον έλεγχο συμβάντων άρδευσης. Τροποποιημένη (Boman et al., 2015, fig. 15).	44
Εικόνα 3.13. Παράδειγμα τριγωνικού ασαφούς συνόλου (Κινγκ, 2004, fig. 5.2).	54
Εικόνα 3.14. Ύψος, κόρος και στήριξη ενός ασαφούς συνόλου (Jager, 1995, fig. 2.2).....	55
Εικόνα 3.15. Συνάρτηση συμμετοχής με απότομη μεταβολή για την έννοια "ψηλός". Τροποποιημένη (MathWorks, 2016).....	57
Εικόνα 3.16. Συνάρτηση συμμετοχής με ομαλή διακύμανση για την έννοια "ψηλός". Τροποποιημένη (MathWorks, 2016).....	57
Εικόνα 3.17. Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).....	59
Εικόνα 3.18. Παράδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).	60
Εικόνα 3.19. Παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).....	60
Εικόνα 3.20. Παράδειγμα γενικευμένης καμπανοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).....	61
Εικόνα 3.21. Παράδειγμα σιγμοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).....	62
Εικόνα 3.22. Μπλοκ διάγραμμα ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπεράσματος (FIS) . Τροποποιημένη (Jang et al., 1997, fig. 4.1).	66
Εικόνα 3.23. Ασαφής ελεγκτής. Τροποποιημένη (Passino and Yurkovich, 1998, fig. 2.1).....	67

Εικόνα 3.24. Γενική μορφή ενός ασαφούς ελεγκτή PD (Jantzen, 2013, fig. 4.3).....	68
Εικόνα 3.25. Ασαφής ελεγκτής PD ενός αντίστροφου εκκρεμούς. Τροποποιημένη (Passino and Yurkovich, 1998).....	69
Εικόνα 3.26. Παράδειγμα ενός τυχαίου τρισδιάστατου πίνακα εκτίμησης κανόνων ελέγχου ενός ασαφούς ελεγκτή PD.....	70
Εικόνα 3.27. Επιφάνεια ελέγχου ασαφούς ελεγκτή PD (MathWorks, 2016)...	71
Εικόνα 4.1. Μπλοκ διάγραμμα του ασαφούς ελεγκτή και μοντέλου του συστήματος. Τροποποιημένη (Bahat et al., 2000, fig. 1).	80
Εικόνα 4.2. Δομή του ασαφούς ελεγκτή. Τροποποιημένη (Zhang et al., 2009, fig. 2).....	80
Εικόνα 4.3. Διάγραμμα μπλοκ και μοντέλο συστήματος του ελεγκτή άρδευσης. Τροποποιημένη (Javadikia et al., 2009, fig. 1).	81
Εικόνα 4.4. Προτεινόμενο μοντέλο για ελεγκτή άρδευσης. Τροποποιημένη (Rahangadale and Choudhary, 2011, fig. 1)	82
Εικόνα 4.5. Βασικό διάγραμμα ενός PD ελεγκτή ασαφούς λογικής για άρδευση καλλιιεργειών. Τροποποιημένη (Ji et al., 2012, fig. 2).....	82
Εικόνα 4.6. Διάγραμμα ελέγχου συστήματος αυτομάτου ποτίσματος. Τροποποιημένη (Ge et al., 2013, fig. 3).	83
Εικόνα 4.7. Δομή του μοντέλου υποστήριξης αποφάσεων. Τροποποιημένη (Mousa et al., 2014, fig. 1).	84
Εικόνα 4.8. Μπλοκ διάγραμμα συστήματος άρδευσης με TNN. Τροποποιημένη (Umair and Usman, 2010, fig. 1).....	85
Εικόνα 5.1. Simulink Library Browser. Γενική Άποψη.	89
Εικόνα 5.2. Κατηγορία “Math Operations” του Simulink Library Browser.	90
Εικόνα 5.3. Η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB αποτελείται από εργαλεία σε γραφικό περιβάλλον (MathWorks, 2016).....	92
Εικόνα 5.4. Διάγραμμα ελέγχου του ευφυούς συστήματος ελέγχου με ασαφή λογική που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.....	93

Εικόνα 5.5. Μοντέλο του συστήματος ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική για τον αυτοματισμό ενός συστήματος άρδευσης.	96
Εικόνα 5.6. Μοντελοποίηση των δεδομένων εισόδου ως σήματα συνεχούς χρόνου όπως φαίνονται στο μπλοκ Signal Builder.....	100
Εικόνα 5.7. Μοντέλο της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά Penman-Monteith	101
Εικόνα 5.8. Μοντέλο της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c	102
Εικόνα 5.9. Μοντέλο της κλίσης της καμπύλης υδρατμών Δ στη θερμοκρασία T	103
Εικόνα 5.10. Μοντέλο της πίεσης κορεσμού υδρατμών στη μέγιστη θερμοκρασία αέρα.	103
Εικόνα 5.11. Μοντέλο της πίεση κορεσμού υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία αέρα.	104
Εικόνα 5.12. Μοντέλο της μέσης πίεσης κορεσμού υδρατμών.	105
Εικόνα 5.13. Μοντέλο της πραγματικής πίεσης υδρατμών.	105
Εικόνα 5.14. Μοντέλο ελλείματος πίεσης υδρατμών.	106
Εικόνα 5.15. Μοντέλο της ψυχομετρικής σταθεράς.....	106
Εικόνα 5.16. Μοντέλο της ατμοσφαιρικής πίεσης.	107
Εικόνα 5.17. Μοντέλο της καθαρής ακτινοβολίας.....	107
Εικόνα 5.18. Καθαρή ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.....	108
Εικόνα 5.19. Μοντέλο καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος.	109
Εικόνα 5.20. Μοντέλο της σταθεράς Stephan – Boltzman.	110
Εικόνα 5.21. Μοντέλο της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας καθαρού ουρανού.	110
Εικόνα 5.22. Μοντέλο της εξωγήινης ακτινοβολίας.	111
Εικόνα 5.23. Μοντέλο της αντίστροφης σχετικής απόστασης μεταξύ γης και ηλίου.	112
Εικόνα 5.24. Μοντέλο της ηλιακής απόκλισης.	112

Εικόνα 5.25. Μοντέλο της γωνίας ώρας δύσης ηλίου.....	113
Εικόνα 5.26. Κεντρική καρτέλα του γραφικού περιβάλλοντος του MATLAB για το σχεδιασμό ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων.....	114
Εικόνα 5.27. Συναρτήσεις συμμετοχής του σφάλματος e	115
Εικόνα 5.28. Συναρτήσεις συμμετοχής του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος e_c	115
Εικόνα 5.29. Συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου t	116
Εικόνα 5.30. Καρτέλα καθορισμού των συναρτήσεων συμμετοχής του σφάλματος e	117
Εικόνα 5.31. Καρτέλα καθορισμού των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβολής του σφάλματος e_c	118
Εικόνα 5.32. Καρτέλα σχεδίασης των συναρτήσεων συμμετοχής του χρόνου άρδευσης t	119
Εικόνα 5.33. Καρτέλα σύνταξης των ασαφών κανόνων-Βάση κανόνων.	121
Εικόνα 5.34. Καρτέλα επισκόπησης των κανόνων ελέγχου.	122
Εικόνα 5.35. Καρτέλα απεικόνισης της επιφάνειας ελέγχου του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.....	123
Εικόνα 6.1. Γραφικές παραστάσεις της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o και της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c	124
Εικόνα 6.2. Γραφικές παραστάσεις της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c και της ποσοτικοποιημένης διάρκειας άρδευσης $k_t \cdot t$	125
Εικόνα 6.3. Σύγκριση διάρκειας άρδευσης υπολογισμένης θεωρητικά και διάρκειας άρδευσης υπολογισμένης μέσω κανόνων ασαφούς λογικής.....	127
Εικόνα 6.4. Γραφικές παραστάσεις του ποσοτικοποιημένου σφάλματος $e \cdot k_e$ και της ποσοτικοποιημένης μεταβολής του σφάλματος $e_c \cdot k_{ec}$, αντίστοιχα. ...	128

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 5.1. Πίνακας των δεδομένων εισόδου από τον μετεωρολογικό σταθμό.	97
Πίνακας 5.2. Πίνακας συνδυασμών για τη σύνταξη ασαφών κανόνων.	120
Πίνακας 5.3. Πίνακας ασαφών κανόνων	120

1. Εισαγωγή

Η διαθεσιμότητα του γλυκού νερού αποτελεί μία από τις στοιχειώδεις προϋποθέσεις για τη ζωή στη Γη. Όμως, το νερό είναι ένας περιορισμένος φυσικός πόρος ο οποίος τελεί υπό πίεση λόγω της παγκόσμιας αύξηση του πληθυσμού, της κλιματικής αλλαγής και της αυξημένης ζήτηση από διάφορους τομείς της οικονομίας, όπως ο τουρισμός, η βιομηχανία και η γεωργία.

Στις μέρες μας, ο τομέας της οικονομίας ο οποίος καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού παγκοσμίως είναι η γεωργία. Σχεδόν το 70% των συνολικών υδατικών πόρων απορροφάται από τη γεωργία, σε αντίθεση με το 20% που καταναλώνεται από τη βιομηχανία και το υπόλοιπο 10% που αφορά οικιακή χρήση (World Water Assessment Programme, 2009).

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τόσο η σημασία που έχει η διαχείριση του νερού όσο και αρκετά θεωρητικά στοιχεία τα οποία αφορούν τις αρχές και την πρακτική των αρδεύσεων. Ιδιαίτέρως, δίνεται έμφαση στην επίδραση των διαφόρων παραγόντων οι οποίοι βοηθούν στον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας νερού από τις καλλιέργειες έτσι ώστε να πραγματοποιείται άρδευση ακριβείας.

Τα προαναφερθέντα θέματα δικαιολογούν την ανάγκη για μια αειφόρο και ορθολογική χρήση του νερού στις αρδευόμενες καλλιέργειες, η οποία παρακινεί την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών αυτόματης άρδευσης ακριβείας που βασίζονται στη θεωρία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της θεωρίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, τόσο των συμβατικών όσο και των ευφυών συστημάτων, καθώς οι τρόποι με τους οποίους μπορεί η θεωρία αυτή να εφαρμοστεί στις αρδεύσεις.

Εκτός από τα προαναφερθέντα, καθώς το θέμα της παρούσας εργασίας σχετίζεται με τη μελέτη, το σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός συστήματος ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική για τον αυτοματισμό ενός συστήματος άρδευσης, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στις βασικές αρχές του ευφυούς ελέγχου. Επίσης, παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις αρχές της θεωρίας της

ασαφούς λογικής καθώς η δομή και η λειτουργία των ασαφών ελεγκτών και των ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων. Συστήματα ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική, σε διάφορες παραλλαγές, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αρδεύσεις σε πολλές χώρες με μεγάλη επιτυχία, εξοικονομώντας σημαντικές ποσότητες νερού.

Επιπλέον, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης, ιδιαίτερα στα ευφυή συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας περιγράφεται λεπτομερώς η δομή του μοντέλου του υπό μελέτη ευφυούς συστήματος άρδευσης.

Παρουσιάζεται αναλυτικά ολόκληρη η διαδικασία βήμα-βήμα, η οποία ακολουθήθηκε από την μελέτη και τον σχεδιασμό μέχρι την πραγματοποίηση της προσομοίωσης του συστήματος στο γραφικό περιβάλλον του Simulink. Για την υποστήριξη του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB.

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος.

Τέλος, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα άλλων παρόμοιων συστημάτων ευφυούς ελέγχου άρδευσης και γίνονται προτάσεις για τη μελλοντικές πιθανές διαφοροποιήσεις του συστήματος που παρουσιάζεται.

2. Διαχείριση του νερού

2.1. Αειφόρος διαχείριση του νερού στη γεωργία

Η αειφόρος ή βιώσιμη διαχείριση του νερού (sustainable water management) στη γεωργία έχει ως κυρίαρχο στόχο να συνδυάσει τη διαθεσιμότητα του νερού και τις ανάγκες σε ποσότητα και ποιότητα νερού, με λογικό κόστος και με αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ενσωμάτωση της αειφόρου διαχείρισης το νερού στη γεωργία εμπλέκει τεχνολογικά προβλήματα, την κοινωνική συμπεριφορά των αγροτικών κοινοτήτων, τους οικονομικούς περιορισμούς, το νομικό και θεσμικό πλαίσιο και τις γεωργικές πρακτικές που εφαρμόζονται (Chartzoulakis and Bertaki, 2015; FAO, 2011).

Στο πλαίσιο της διαχείρισης της ζήτησης του νερού, εστιάζεται με μεγαλύτερη προσοχή ο προγραμματισμός των αρδεύσεων, δηλαδή πότε να γίνει άρδευση και πόση ποσότητα νερού χρειάζεται να προσφερθεί, δίνοντας δευτερεύοντα ρόλο στις μεθόδους άρδευσης. Πολλές παράμετροι, όπως είναι το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και η ευαισθησία της στην έλλειψη νερού, οι κλιματικές συνθήκες και η διαθεσιμότητα του νερού στο έδαφος, καθορίζουν πότε χρειάζεται να αρδευτεί η καλλιέργεια, η λεγόμενη συχνότητα άρδευσης. Ωστόσο, αυτή η συχνότητα εξαρτάται από τη μέθοδο άρδευσης και, ως εκ τούτου, τόσο ο προγραμματισμός άρδευσης όσο και η μέθοδος άρδευσης είναι αλληλένδετα (Chartzoulakis and Bertaki, 2015; ICID/FAO, 1995).

2.1.1. Δυνατότητα εξοικονόμησης νερού

Σε χώρες με περιορισμένους υδατικούς πόρους, όπου η άρδευση των γεωργικών εκτάσεων απαιτεί περισσότερο από το 70% της χρήσης του νερού, ο ανταγωνισμός με άλλους τομείς για τη χρήση του φυσικού αυτού πόρου μεγαλώνει διαρκώς και θα συνεχίσει έτσι για όσο διάστημα η ζήτηση για νερό αυξάνεται και η ποιότητα του μειώνεται (Fereres and Evans, 2006). Η αναποτελεσματική χρήση του νερού στο γεωργικό τομέα είναι ένα διαβόητο φαινόμενο, ειδικά όταν εκφράζεται με όρους οικονομικής απόδοσης ανά κυβικό μέτρο και συγκρίνεται με άλλους τομείς με υψηλότερη δυνατότητα οικονομικής παραγωγικότητας, όπως είναι η βιομηχανία και ο τουρισμός. Μια βελτίωση της

τάξης του 10% της απόδοσης στις αρδευόμενες καλλιέργειες μπορεί να εξασφαλίσει περισσότερο νερό από όσο είναι απαραίτητο για το σύνολο των οικιακών και βιομηχανικών αναγκών μιας χώρας.

Η βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης νερού (water use efficiency, WUE) ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου αποτελεί επιτακτική ανάγκη και επιβάλλεται από την κρίσιμη κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι υδατικοί πόροι που υπάρχουν στην περιοχή, καθώς και από την αύξηση του πληθυσμού (Katerji et al., 2008). Το 2012, στην έκθεση της ευρωπαϊκής ένωσης για τον εντοπισμό δυνατοτήτων εξοικονόμησης νερού στις χώρες της ΕΕ, αναφέρεται ότι η βελτίωση της απόδοσης στην εφαρμογή του νερού μπορεί να εξοικονομήσει από 15 έως 60% της συνολική χρήσης του νερού (Mudgal et al., 2012).

Αποτελέσματα από μελέτες περιπτώσεων σε μεθόδους μεταβλητών ποσοστών άρδευσης έδειξε ότι μπορεί να προκύψει εξοικονόμηση νερού κατά μέσο όρο, σε μακρός χρόνου, από 8 έως 20% (Smith et al., 2010). Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των αρδεύσεων ακριβείας (precision irrigations) έχουν βελτιώσει σημαντικά τις προϋπάρχουσες γνώσεις σχετικά με την ανοχή των καλλιεργειών στην έλλειψη νερού και για την ικανότητα των εδαφών για την παροχή νερού, και έχουν οδηγήσει στην εφαρμογή των ρυθμιζόμενων ελλειμματικών αρδεύσεων, εξοικονομώντας υδατικούς πόρους μεταξύ 15 και 30% (Ruiz-Sanchez et al., 2010).

Η εξοικονόμηση νερού που προκύπτει από τη μη άρδευση των μη καλλιεργούμενων περιοχών του αγρού συμβάλει θετικά στον προγραμματισμό των αρδεύσεων για την κάλυψη των πραγματικών υδατικών απαιτήσεων των καλλιεργειών και την πλήρη βελτιστοποίηση της οικονομικής αξίας του νερού που παρέχεται μέσω της άρδευσης (Sadler et al., 2005). Η παραπάνω δυνατότητα μπορεί να επιτευχθεί μέσω αρδεύσεων ακριβείας, οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν από οποιοδήποτε σύστημα το οποίο δύναται να προσδιορίζει το χρονοδιάγραμμα, το μέγεθος και τη χωρική κατανομή κάθε περίπτωσης για την επόμενη άρδευση, έτσι ώστε να προσφέρει την καλύτερη ευκαιρία για την επίτευξη του εποχικού στόχου, δηλαδή μεγιστοποίηση της απόδοσης της σοδειάς, της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας της χρήσης του νερού (Smith et al., 2010).

2.1.2. Στρατηγικές εξοικονόμησης νερού

Η διαχείριση των υδατικών αναγκών (water demand management: WDM) συστήνεται ολοένα και περισσότερο ως μια στρατηγική άμβλυνσης των προβλημάτων λειψυδρίας, μέσω μιας ποικιλίας συμμετοχικών μέτρων, περιλαμβάνοντας τα τεχνικά, πολιτικά, θεσμικά, οικονομικά, εκπαιδευτικά εργαλεία με σκοπό την ενημέρωση για την καλύτερη χρήση των υφιστάμενων πόρων, πριν παρατηρηθεί αυξημένη ζήτηση. Εκτιμάται ότι με τη βελτιωμένη διαχείριση των υδατικών αναγκών μπορεί να καταστήσει δυνατή εξοικονόμηση περίπου ίση με το 25% της ζήτησης νερού (UNEP, 2006). Επίσης, η πρόοδος στην επιστήμη και την τεχνολογία αποτελούν αποδοτικά εργαλεία στον έλεγχο κάθε σταγόνας νερού του υδρολογικού κύκλου.

Στο γεωργικό τομέα, οι αγρότες γνωρίζουν πόσο σημαντικό είναι το νερό για την απόδοση των καλλιεργειών τους και ότι οποιαδήποτε παρουσία έλλειψης νερού έχει αρνητικές συνέπειες στην τελική σοδειά. Όταν οι υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών καλύπτονται ικανοποιητικά, η σοδιά ευδοκίμει. Αλλιώς, η παραγωγή μειώνεται. Επιπλέον, η διαχείριση του νερού αποτελεί μια δυναμική και σύνθετη διαδικασία η οποία απαιτεί τόσο γνώση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του συστήματος διανομής νερού, όσο της ποιότητας του εδάφους ενός χωραφίου και του νερού άρδευσης. Ακόμη, απαιτείται γνώση της διαδραστικής διαδικασίας ανάμεσα στα λιπάσματα, στο έδαφος, στο νερό, στα φυτά και την ατμόσφαιρα. Επειδή, όμως, όλα αυτά απαιτούν την ύπαρξη θεωρητικού υποβάθρου στη διαχείριση γεωργικών εκμεταλλεύσεων και την αρδευόμενη γεωργία, προκαλούν φόβο για πιθανές απώλειες στη σοδεία που σχετίζονται με το νερό. Συνεπώς, οδηγούν τους αγρότες σε υπεράρδευση και τους αποτρέπουν από την υιοθέτηση πρακτικών εξοικονόμησης νερού, ιδίως όταν το κόστος της ποσότητας του νερού που θα μπορούσε να σωθεί δεν ξεπερνά εκείνο της επένδυσης της γεωργικής εγκατάστασης. Η τάση αυτή φαίνεται να μη συνεχίζει, καθώς ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες βρίσκονται στην αναζήτηση αποτελεσματικών λύσεων για τη διάσωση των υδατικών πόρων της Ευρώπης (EC, 2012, 2007, 2000).

Η ιστορία της έρευνας επιβεβαιώνει ότι η άρδευση ακριβείας είναι τεχνολογικά εφικτή μέσω αισθητήρων μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων και

συστημάτων υποστήριξης-λήψης αποφάσεων (Greenwood et al., 2009; McCarthy et al., 2011).

Στις μέρες μας υπάρχει μια ευρεία ποικιλία πιθανών λύσεων που διατίθενται στην αγορά. Ξεκινούν από την πιο απλή περίπτωση βασιζόμενη σε χειροκίνητες μεθόδους και φτάνουν ως πολύπλοκες περιπτώσεις όπως η δορυφορική απεικόνιση.

Η χρήση τεχνικών από την τεχνητή νοημοσύνη, όπως είναι οι ευφυείς ελεγκτές άρδευσης οι οποίοι βασίζονται σε ασαφή λογική, μπορούν να εκτιμούν το νερό που απαιτείται για την κάλυψη των υδατικών αναγκών των φυτών χρησιμοποιώντας αξιόπιστα μοντέλα άρδευσης, εξισώσεις υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, περιβαλλοντικές συνθήκες και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την άρδευση (Ji et al., 2012).

2.2. Η άρδευση των καλλιεργειών

Γενικά, ως άρδευση ορίζεται η διαδικασία τεχνητής παροχή νερού σε καλλιέργειες. Σύμφωνα με τον Stern (1979), άρδευση είναι οποιαδήποτε διαδικασία, εκτός του φυσικού καταιονισμού, η οποία παρέχει νερό στις καλλιέργειες, στους οπωρώνες, στο γρασίδι και σε άλλα καλλιεργούμενα φυτά.

Τα φυτά μπορούν από μόνα τους να παράγουν την δικιά τους τροφή χρησιμοποιώντας φυσικούς πόρους όπως το έδαφος, το νερό, ο αέρας και ήλιος. Μπορούν επίσης να παράγουν περισσότερο από όσο είναι αναγκαίο για την επιβίωση και την αναπαραγωγή τους. Τα φυτά, όμως, δε μπορούν να επιβιώσουν και να παράγουν την τροφή τους χωρίς νερό. Ένας από τους βασικότερους παράγοντες για την εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής των φυτών είναι η άρδευση. Για να εξοικονομηθούν τα μέγιστα οφέλη από την άρδευση, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η απαιτούμενη ποσότητα νερού η οποία εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους, όπως είναι το περιβάλλον, η υδρολογική κατάσταση του υπεδάφους, ο τύπος της καλλιέργειας και το στάδιο της ανάπτυξης (Ali, 2010a).

Σε μια διαρκώς εξελισσόμενη γεωργία, η άρδευση των καλλιεργειών είναι αναγκαίο να προσαρμοστεί σε νέες, πιο αυστηρές διαδικασίες. Η παροχή νερού

μέσω μεγάλης κλίμακας αρδευτικών συστημάτων χρειάζεται να είναι πιο αξιόπιστη και ευέλικτη από το παρελθόν.

Μέσω αρχαιολογικών ερευνών έχουν έρθει στο φως στοιχεία τα οποία αποδεικνύουν τη χρήση αρδευτικών μεθόδων στην αρχαιότητα. Ένας τρόπος διαχείρισης του νερού στην Αίγυπτο και τη Μεσοποταμία, πριν από περίπου 8000 χρόνια, ήταν η άρδευση από λεκάνες απορροής (basin irrigation), χρησιμοποιώντας το νερό των πλημμυρισμένων ποταμών Νείλου και Τίγρη-Ευφράτη (Taylor and Ashcroft, 1972).

2.3. Το διαθέσιμο εδαφικό νερό στις καλλιέργειες

2.3.1. Εδαφική υγρασία

Η δομή του εδάφους δεν είναι συμπαγής, καθώς ανάμεσα στα συσσωματώματα του εδάφους υπάρχει ένα δίκτυο αποτελούμενο από πόρους οι οποίοι περιέχουν νερό ή αέρα. Σε περίπτωση που όλοι οι πόροι του εδάφους γεμίσουν με νερό και δεν υπάρχει σε αυτούς καθόλου αέρας, όπως συμβαίνει μετά από μια άρδευση ή μια βροχή, λέμε ότι το έδαφος έφτασε σε κατάσταση κορεσμού (Παπαζαφειρίου, 1984).

Ύστερα από την παρέλευση κάποιου χρόνου μετά την κατάσταση κορεσμού του εδάφους, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, το νερό αρχίζει να στραγγίζει, δηλαδή να απομακρύνεται προς τα κάτω και τη θέση του νερού στους πόρους παίρνει ο αέρας. Το νερό αυτό καταλήγει σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα, εκτός της περιοχής του ριζοστρώματος και ονομάζεται νερό βαρύτητας. Το νερό βαρύτητας δεν είναι διαθέσιμο στα φυτά λόγω της ταχείας απομάκρυνσής του από το έδαφος. Το νερό που συγκρατείται από τους μικρότερους πόρους του έδαφος μετά την απομάκρυνση του νερού βαρύτητας, ονομάζεται τριχοειδές νερό. Το νερό αυτό είναι διαθέσιμο στα φυτά, μέσω του ριζικού τους συστήματος (Παπαζαφειρίου, 1984).

Η ποσότητα του νερού του εδάφους ελαττώνεται διαρκώς και αυτό που παραμένει συγκρατείται από πολύ ισχυρές δυνάμεις των μορίων του εδάφους. Ύστερα από ένα σημείο, παρόλο που υπάρχει μια ποσότητα νερού στο έδαφος, το έδαφος δείχνει να είναι ξηρό. Οι δυνάμεις του εδάφους οι οποίες συγκρατούν το νερό είναι αρκετά ισχυρές ώστε να υπερνικηθούν από τις ρίζες για να

προσλάβουν νερό. Το ελάχιστο παραμένον νερό στο έδαφος ονομάζεται υγροσκοπικό νερό (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.3.2. Προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας

Εδαφική υγρασία ή περιεκτικότητα σε νερό ενός δείγματος εδάφους, ορίζεται ως η ποσότητα του νερού που χάνεται από το χώμα κατόπιν ξήρανσης του στους 105°C και εκφράζεται είτε ως ποσοστό ανά μονάδας βάρους του νερού στο ξηρό χώμα είτε ως ποσοστό ανά μονάδας όγκου του νερού στο μεγαλύτερο μέρος του εδάφους (Ali, 2010b).

Βασικό ρόλο σε μία καλή διαχείριση αρδευτικού νερού για γεωργική χρήση παίζει η διαρκής παρακολούθηση και μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οικονομικές απώλειες λόγω των επιδράσεων της υποάρδευσης και της υπεράρδευσης στην παραγωγή και την ποιότητα, σπατάλη νερού και ενέργειας και έκπλυση των θρεπτικών συστατικών και των χημικών στην επιφάνεια του εδάφους και στα υπόγεια νερά.

Σύμφωνα με τον Ali (2010b), οι τεχνικές μέτρησης της εδαφικής υγρασίας μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

α) Άμεσες μέθοδοι μέτρησης της εδαφικής υγρασίας.

Οι άμεσες μέθοδοι μέτρησης της εδαφικής υγρασίας περιλαμβάνουν μόνο την τεχνική της βαρυμετρικής μέτρησης της υγρασίας του εδάφους. Η τεχνική της βαρυμετρικής μεθόδου απαιτεί δειγματοληψία εδάφους από το πεδίο και μεταφορά του στο εργαστήριο για ζύγιση και απομάκρυνση της υγρασίας του θερμαίνοντάς το σε ειδικό κλίβανο ξήρανσης.

β) Έμμεσες μέθοδοι μέτρησης της εδαφικής υγρασίας.

Οι έμμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν διάφορες προσεγγίσεις και τεχνικές προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας, εστιάζοντάς στη μέτρηση ορισμένων φυσικών, χημικών, ηλεκτρικών, θερμικών, ακουστικών ιδιοτήτων του εδάφους. Οι περισσότερες τεχνικές απαιτούν την τοποθέτηση κάποιου σχετικού αισθητήρα, ο οποίος παραμένει μόνιμα τοποθετημένος. Ορισμένες τεχνικές απαιτούν την τοποθέτηση του αισθητήρα κοντά στην επιφάνεια χωρίς παρεμβολές, όπως είναι οι ραδιοσυχνότητες, και κάποιες ακουστικές και θερμικές τεχνικές.

Οι έμμεσες μέθοδοι μέτρησης περιλαμβάνουν τις ακόλουθες μεθόδους (Ali, 2010b; Παπαζαφειρίου, 1984; Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 2004):

1. Ραδιολογική μέθοδος.

α) Τεχνική σκεδασμού νετρονίων.

Η τεχνική αυτή μετρά την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό βάσει της μέτρησης της περιεκτικότητάς του σε υδρογόνο, αφού το υδρογόνο στο έδαφος βρίσκεται σαν κύριο συστατικό του νερού στη στερεή, υγρή ή αέρια φάση του εδάφους.

β) Τεχνική απόσβεσης ακτίνων γ.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην απορρόφηση ακτινοβολίας γ όταν μια δέσμη της ακτινοβολίας αυτής αφεθεί να διέλθει δια μέσου ενός υλικού. Το ποσοστό απορρόφησης ακτινοβολίας γ από το έδαφος αποτελεί ένδειξη της εδαφικής υγρασίας.

2. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Τεχνική ανκλασιμετρίας στο πεδίο του χρόνου (TDR).

Ένα ανακλασίμετρο στο πεδίο του χρόνου μετρά τις ανακλάσεις ενός εφαρμοζόμενου παλμού τάσης στο χρόνο. Η εδαφική υγρασία συνίσταται από τη διηλεκτρική σταθερά του μέσου. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα συνίσταται από την εξασθένηση του σήματος της TDR.

3. Μέθοδος πλακιδίων ηλεκτρικής αντίστασης - γύψινων πλακιδίων.

Τα όργανα μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια τα οποία είναι ενσωματωμένα σε ένα γύψινο ή παρεμφερούς υλικού πλακίδιο.

4. Τενσιομετρική μέθοδος. Με χρήση τενσιομέτρων (τασιμέτρων).

Με τη μέθοδο αυτή μετράται το δυναμικό ή η ενέργεια του νερού του εδάφους. Τα τενσιόμετρα ή τασίμετρα αποτελούνται από ένα κύπελλο από πορώδες υλικό στο κάτω μέρος τους και από ένα μανόμετρο το οποίο μετράει την εδαφική υγρασία.

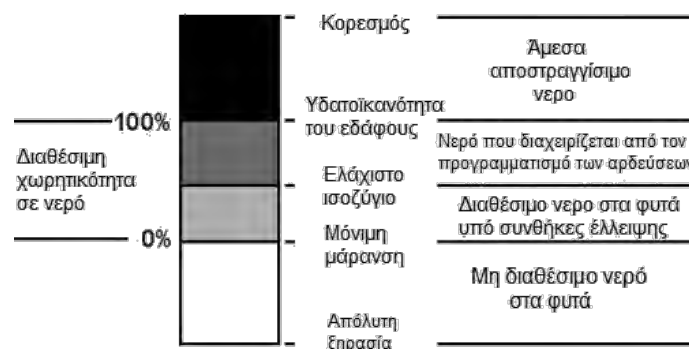
Όταν το έδαφος είναι ξηρό, το νερό μετακινείται από το πορώδες κύπελο στο έδαφος, δημιουργώντας κενό μέσα στο σωλήνα. Το κενό αυτό μετράται από το μανόμετρο και μεταφράζεται σε εδαφική υγρασία.

Οι Γράβαλος et al. (2006) παρουσιάζουν μια συγκριτική μελέτη διαφόρων αισθητήριων μέτρησης εδαφικής υγρασίας και παρατηρούν ότι οι αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται στη μέθοδο TDR παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης. Επίσης, κατά τη σύγκριση μετρήσεων που προκύπτουν από τη βαρυμετρική μέθοδο και μετρήσεων που προκύπτουν από αισθητήρες, οι αποκλίσεις δεν είναι σημαντικές.

2.3.3. Συνθήκες υγρασίας του εδάφους

Η διαθέσιμη χωρητικότητα σε νερό και η ικανότητα συγκράτησης του νερού από το έδαφος αποτελούν κρίσιμα χαρακτηριστικά για το σχεδιασμό της διαχείρισης του νερού στην αρδεύμενη γεωργία. Οι λήψεις αποφάσεων για το είδος της καλλιέργειας, τον πληθυσμό των φυτών, τον προγραμματισμό των αρδεύσεων και της λίπανσης, βασίζονται, εν μέρει, στην υδατοϊκανότητα του εδάφους.

Η συνετή διαχείριση των αποφάσεων για άρδευση είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ποσότητας και της ποιότητας των υδατικών πόρων στις αρδεύμενες περιοχές.



Εικόνα 2.1. Στοιχεία της δεξαμενής νερού του εδάφους. Τροποποιημένη. Available at: <http://croptechnology.unl.edu/> [Accessed 28 Mar. 2016].

2.3.3.1. Υδατοϊκανότητα του εδάφους

Ως υδατοϊκανότητα του εδάφους (field capacity, FC) ορίζεται το ποσό του νερού ή της υγρασίας που δύναται να συγκρατεί το έδαφος μετά τη στράγγιση του νερού βαρύτητας.

Ένας πληρέστερος ορισμός της υδατοϊκανότητας είναι το όριο της εδαφικής υγρασίας όπου η τριχοειδής αγωγιμότητα έχει πολύ μικρή τιμή και στην ουσία έχει σταματήσει να κινείται το νερό στο έδαφος. Η τιμή της υγρασίας χρειάζεται τρεις με πέντε περίπου μέρες για να φτάσει στην υδατοϊκανότητα (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.3.3.2. Σημείο μόνιμης μάρανσης

Το σημείο μόνιμης μάρανσης (permanent wilting point, PWP) είναι το κατώτατο όριο υγρασίας όπου τα φυτά είναι ανίκανα να πάρουν από το έδαφος όλη την ποσότητα νερού που απαιτείται για να καλύψουν τις ανάγκες τους και αρχίζουν να μαραίνονται. Η κατάσταση αυτή θεωρείται μη αναστρέψιμη για τα φυτά. Το σημείο μόνιμης μάρανσης εξαρτάται από το έδαφος και από το είδος των φυτών, καθώς και από τις κλιματικές συνθήκες που υπάρχουν στην περιοχή (Brouwer et al., 1985; Παπαζαφειρίου, 1984).

2.3.3.3. Διαθέσιμη και ωφέλιμη υγρασία

Ως διαθέσιμη εδαφική υγρασία ορίζεται η ποσότητα του νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα έδαφος ανάμεσα στο σημείο μόνιμης μάρανσης και την υδατοϊκανότητά του. Τα φυτά δε μπορούν να αντλήσουν όλη τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία αλλά ένα ποσοστό αυτής. Ο ποσό της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας που μπορεί να εκμεταλλευτεί από τα φυτά, ονομάζεται ωφέλιμη υγρασία (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4. Κατανάλωση νερού από τις καλλιέργειες

Βασικός στόχος της άρδευσης είναι ο εφοδιασμός των καλλιεργούμενων φυτικών ειδών με την κατάλληλη ποσότητα νερού η οποία είναι απαραίτητη για την κανονική ανάπτυξη τους αλλά και για τη επίτευξη της μέγιστης απόδοσης με την υψηλότερη ποιότητα γεωργικών προϊόντων.

Τα φυτά, μέσω του ριζικού τους συστήματος, προσλαμβάνουν νερό μαζί τα αναγκαία θρεπτικά συστατικά, τα οποία βρίσκονται διαλυμένα μέσα σε αυτό. Το νερό καταλήγει στην ατμόσφαιρα σε μορφή υδρατμών, εφόσον τα στόματα των φύλλων είναι ανοικτά και αφού προηγουμένως ακολουθήσει τη διαδρομή ρίζα-βλαστοί-φυτικοί ιστοί-φύλλα (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.1. Διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής

Εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration, ET) είναι ο συνδυασμός δύο ξεχωριστών διαδικασιών όπου, το νερό, κατά την πρώτη διαδικασία χάνεται από την επιφάνεια του εδάφους με την εξάτμιση και κατά τη δεύτερη διαδικασία χάνεται από την καλλιέργεια με τη διαπνοή (Allen et al., 1998).



Εικόνα 2.2. Κύκλος του νερού στην επιφάνεια της Γης, παρουσιάζοντας ξεχωριστά τα συστατικά της διαπνοής και της εξάτμισης που αποτελούν την εξατμισοδιαπνοή. Τροποποιημένη. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Evapotranspiration> [Accessed 28 Mar. 2016].

2.4.1.1. Εξάτμιση

Η διαδικασία κατά την οποία το νερό μετατρέπεται σε ατμούς νερού και μετακινείται από την εξατμιζόμενη επιφάνεια ονομάζεται εξάτμιση. Εξατμιζόμενη επιφάνεια είναι η επιφάνεια του εδάφους. Η διαδικασία της

εξάτμισης επηρεάζεται από το βαθμό σκίασης της καλλιέργειας και τη διαθέσιμη ποσότητα νερού στην εξατμιζόμενη επιφάνεια.

2.4.1.2. Διαπνοή

Η διαπνοή αποτελείται από την ατμοποίηση του νερού που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς και τη μετακίνηση των ατμών στην ατμόσφαιρα. Οι καλλιέργειες χάνουν το νερό μέσω των στομάτων των φύλλων. Τα στόματα των φύλλων είναι μικρά ανοίγματα στα φύλλα των φυτών από όπου περνούν αέρια και ατμοί. Η διαπνοή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, ορισμένοι από τους οποίους είναι κάποιοι κλιματικοί παράγοντες, χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, τεχνικές καλλιέργειας κ.α.

2.4.1.3. Εξατμισοδιαπνοή (ET)

Σύμφωνα με τους Allen et al. (1998), η εξάτμιση και η διαπνοή συμβαίνουν ταυτόχρονα και δεν υπάρχει εύκολος τρόπος διάκρισης μεταξύ των δύο διαδικασιών. Εκτός από την διαθεσιμότητα του νερού στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους, η εξάτμιση από το σπαρμένο έδαφος καθορίζεται κυρίως από το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς η καλλιέργεια αναπτύσσεται και οι σκιές των φυλλωμάτων καλύπτουν όλο και περισσότερο την περιοχή του εδάφους.

Σε νεαρές καλλιέργειες, το νερό χάνεται κυρίως λόγω της εξάτμισης του εδάφους. Όταν η καλλιέργεια είναι καλά ανεπτυγμένη και καλύπτει πλήρως το έδαφος, η διαπνοή αποτελεί κύρια διαδικασία.

Κατά τη διάρκεια της σποράς, σχεδόν 100% της εξατμισοδιαπνοής προέρχεται από την εξάτμιση, ενώ σε πλήρη κάλυψη της καλλιέργειας περισσότερο από το 90% της εξατμισοδιαπνοής προέρχεται από τη διαπνοή.

Ο ρυθμός μεταβολής μετράται συνήθως σε χιλιοστά να μονάδα χρόνου (mm per unit time) και εκφράζει την ποσότητα του νερού που χάνεται από μια καλλιεργούμενη επιφάνεια σε μονάδες βάθους του νερού. Η μονάδα χρόνου μπορεί να είναι ώρα, ημέρα, μήνας ή ακόμη η καλλιεργητική περίοδος ή ένα έτος.

Η εκτίμηση και ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής καθώς επίσης και ο προσδιορισμός των εδαφικών σταθερών όπως είναι η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, η υδατοϊκανότητα, το σημείο μόνιμης μάρανσης, η διαθέσιμη υγρασία, η ωφέλιμη υγρασία κλπ, αποτελούν πολύτιμα στοιχεία για την έγκαιρη πληροφόρηση για το σωστό προγραμματισμό των αρδεύσεων. Η εφαρμογή ορθολογικά σχεδιασμένης άρδευσης ελαχιστοποιεί τους κινδύνους αστοχίας και μη οικονομικών επενδύσεων. Ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής και το τελικό μέγεθός της επηρεάζονται από τις κλιματικές συνθήκες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα φυτά (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.2. Φυτικοί παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό της εξατμισοδιαπνοής

2.4.2.1. Το είδος του φυτού

Ο τύπος του φυτού, η ποικιλία του και το στάδιο ανάπτυξής του πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν γίνεται προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής από καλλιέργειες οι οποίες αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις. Οι διαφορές στην αντίσταση, τη διαπνοή, το ύψος της καλλιέργειας, την ανάκλαση κ.α., έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικά επίπεδα εξατμισοδιαπνοής σε διαφορετικούς τύπους καλλιέργειας, κάτω από τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Όπως είναι γνωστό, τα διάφορα είδη φυτών έχουν διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά τη δομή του ριζικού τους συστήματος, την εποχή του χρόνου κατά την οποία αναπτύσσονται καθώς και στην πυκνότητα και την έκταση που παρουσιάζει το φύλλωμά τους. Συνεπώς, λόγω των διαφορών αυτών, σε συνάρτηση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το μέγεθος και ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής διαφοροποιείται από είδος σε είδος (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.2.2. Η ανακλαστικότητα του φυλλώματος

Το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται από το ύψος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τις επιφάνειες στις οποίες προσπίπτει. Η ανακλαστικότητα του φυλλώματος (albedo) καθορίζει το ύψος της ηλιακής ακτινοβολίας και επηρεάζεται από την πυκνότητα καλλιέργειας των φυτών (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.2.3. Το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από το φύλλωμα

Η διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται σημαντικά από το ποσοστό του εδάφους το οποίο καλύπτεται από το φύλλωμα των καλλιεργούμενων φυτών.

Έτσι, όπως είναι αναμενόμενο, η εξατμισοδιαπνοή γίνεται μέγιστη όταν το ποσοστό φυτοκάλυψης είναι 100%. Στην πραγματικότητα, ακόμη και αν το ποσοστό φυτοκάλυψης είναι 50-60%, ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής φτάνει κοντά στο ποσοστό που αντιστοιχεί σε 100% φυτοκάλυψη (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.2.4. Το ύψος των φυτών

Για τα ψηλότερα φυτά μπορεί να θεωρηθεί ότι δέχονται περισσότερη έμμεση ανοδική ακτινοβολία από το έδαφος σε σχέση με τα χαμηλότερα φυτά και παρατηρείται αύξηση του ρυθμού της εξατμισοδιαπνοής (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.2.5. Το βάθος και η πυκνότητα του ριζικού συστήματος

Η εξατμισοδιαπνοή επηρεάζεται έμμεσα από το βάθος και την πυκνότητα του ριζικού συστήματος. Σε περιοχές με ξηρό και ημίξηρο κλίμα και συνεκτικά εδάφη, τα φυτά που διαθέτουν πυκνό και βαθύ ριζικό σύστημα, μπορούν να αξιοποιήσουν ευκολότερα την υγρασία του εδάφους, σε αντίθεση με άλλα φυτά (Παπαζαφειρίου, 1984).

2.4.2.6. Το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου των φυτών, ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής μεταβάλλεται διαρκώς. Αρχικά, από το φύτευμα μέχρι την πλήρη ανάπτυξη η εξατμισοδιαπνοή αυξάνει γρήγορα. Στη συνέχεια, διατηρείται σταθερή για ένα χρονικό διάστημα μέχρι το στάδιο συλλογής των καρπών και μετά ελαττώνεται (Allen et al., 1998).

2.4.3. Κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή

Οι κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν βασικά το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής είναι η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια και η αεροδυναμική κατάσταση της ατμόσφαιρα. Έτσι, ρυθμίζεται η ταχύτητα απομάκρυνσης των υδρατμών από την περιοχή του φυλλώματος και προσδιορίζεται ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής.

Συνεπώς, για μια κανονικά αναπτυσσόμενη καλλιέργεια, της οποίας το φύλλωμα καλύπτει σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια του εδάφους, το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής εξαρτάται από το κλίμα που υπάρχει στην περιοχή και ιδιαιτέρως από τη λανθάνουσα θερμότητα, την καθαρή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου, τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και τέλος τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Τα μεγέθη αυτά συνδέονται με τη μαθηματική έκφραση του ενεργειακού ισοζυγίου της γης, όπως φαίνεται παρακάτω (Παπαζαφειρίου, 1984):

$$R_n + H + LE + G = 0 \quad (2.1)$$

Όπου:

R_n : Η καθαρή ακτινοβολία που παραμένει στη γη

H : Η ροή θερμότητας σε $\text{cal/cm} \cdot \text{min}^2$

LE : Η λανθάνουσα θερμότητα

G : Η κατακόρυφη μεταφορά της θερμότητας

2.4.4. Έμμεσες μικροκλιματικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής

Με απώτερο σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση διαφόρων μεθόδων που υπολογίζουν την εξατμισοδιαπνοή, δημιουργήθηκε ο όρος της δυναμικής ή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Potential evapotranspiration - ET_p). Με τον όρο αυτό εκφράζεται η συνολική ποσότητα του νερού που καταναλώνεται από μια καλλιέργεια χαμηλού ύψους ανάπτυξης, αλλά με φύλλωμα που καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του εδάφους και τη δυνατότητα να αντλείται από το έδαφος όση ποσότητα νερού είναι αναγκαία για

την καλλιέργεια. Συνεπώς, η εξατμισοδιαπνοή αυτή επηρεάζεται κυρίως από τις συνθήκες του κλίματος της περιοχής ανάπτυξης της καλλιέργειας (Παπαζαφειρίου, 1984).

Επίσης, υπάρχουν και οι μικροκλιματικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και αναλόγως με τα στοιχεία που χρειάζονται, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

α) Στην αεροδυναμική μέθοδο, η οποία λαμβάνει κυρίως υπόψη το μηχανισμό με τον οποίο μεταφέρονται οι υδρατμοί από την περιοχή του φυλλώματος των καλλιεργειών.

β) Στη μέθοδο του ισοζυγίου της ενέργειας, βάσει της εκτίμησης της λανθάνουσας θερμότητας.

γ) Σε μεθόδους συνδυασμού των δύο προηγούμενων.

2.4.5. Έμμεσες εμπειρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής

Όταν πρόκειται να κατασκευαστούν αρδευτικά δίκτυα, απαιτείται η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της περιοχής. Είναι αναγκαίο η εκτίμηση αυτή να γίνει με έμμεσες εμπειρικές μεθόδους για δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος έχει σχέση με το είδος, τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των κλιματικών στοιχείων που υπάρχουν στην περιοχή και ο δεύτερος με την έκταση της πηγής που θα εξυπηρετηθεί από καθορισμένη παροχή νερού.

Είναι αναμενόμενο ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών των εμπειρικών μεθόδων για την εξατμισοδιαπνοή διαφέρουν αριθμητικά από τα μεγέθη της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας E_T , καθώς αυτή διαμορφώνεται από το συνδυασμό των συνθηκών περιβάλλοντος και της καλλιέργειας.

Μια από τις βασικές θεωρητικές, εμπειρικές, έμμεσες και άμεσες μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς αλλά και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής αποτελεί η απλοποιημένη μέθοδος Blaney-Criddle. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή ως συνάρτηση διαφόρων παραγόντων. Η μαθηματική διατύπωση της σχέσης αυτής είναι (Παπαζαφειρίου, 1984):

$$ET = K \cdot F \quad (2.2)$$

Όπου:

K= Ο εποχιακός φυτικός συντελεστής.

F=Κλιματικός παράγοντας που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sum_{j=1}^n [0.46 \cdot T_j + 8.16] \cdot p_j \quad (2.3)$$

Όπου:

T_j: Η μέση θερμοκρασία κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου (°C).

p_j: Ο μηνιαίος παράγοντας που εκφράζει τη μηνιαία διάρκεια της ημέρας σαν ποσοστό της αντίστοιχης ετήσιας διάρκειας.

2.4.6. Μέθοδοι υπολογισμού της πραγματικής

εξατμισοδιαπνοής ή εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

Ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (crop evapotranspiration) είναι θεμελιώδους σημασίας και ουσιαστικά αποτελεί τη συνολική ποσότητα του νερού που χάνεται σε ένα χωράφι, σε οποιαδήποτε καλλιέργεια φυτών. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c αναφέρεται στις πραγματικές ανάγκες των φυτών σε νερό και επηρεάζεται από:

- Τις κλιματικές συνθήκες.
- Τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας
- Τις τοπικές συνθήκες.
- Την εφαρμοζόμενη τεχνική καλλιέργειας.

Οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής καθορίζουν την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς είναι ανεξάρτητη από το είδος της καλλιέργειας και για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται μέθοδοι που παρουσιάζονται παρακάτω. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, διαμορφώνεται ο συντελεστής καλλιέργειας (crop coefficient) K_c, ο οποίος είναι μια σταθερά αναλογία που συνδέει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o με την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2.4)$$

Όπου:

ET_c : Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (mm day^{-1}).

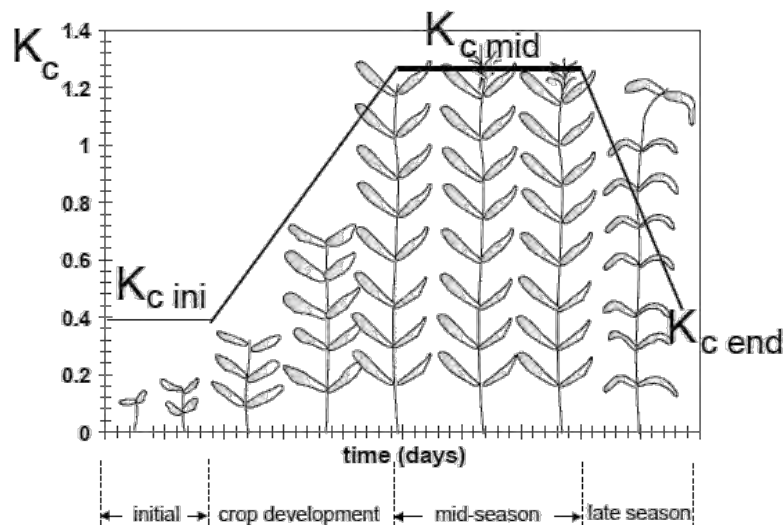
K_c : Ο συντελεστής καλλιέργειας.

ET_o : Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}).

Η καλλιεργητική περίοδος ενός φυτού φαίνεται στην Εικόνα 2.3 και αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- Αρχικό στάδιο ανάπτυξης (initial).
- Στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας (crop development).
- Μέσο στάδιο ανάπτυξης (mid-season).
- Τελικό στάδιο ανάπτυξης (late season).

Η διάρκεια του κάθε σταδίου ποικίλει ανάλογα με το είδος του φυτού και την χρονική περίοδο έναρξης της καλλιέργειας.



Εικόνα 2.3. Γενική καμπύλη μεταβολής του συντελεστή καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Allen et al., 1998, fig. 25).

Σύμφωνα με τον Ali (2010b), ο συντελεστής καλλιέργειας K_c εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Το είδος της καλλιέργειας.
- Το στάδιο και τη φάση ανάπτυξης του φυτού.

- Το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από την καλλιέργεια.
- Το σύστημα διαχείρισης (χαμηλή ή υψηλή διαχείριση).
- Τις τοπικές κλιματικές συνθήκες.
- Τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ή μεμονωμένου σταδίου καλλιέργειας.
- Τη συχνότητα των βροχοπτώσεων και της άρδευσης.
- Το ιστορικό άρδευσης κατά την πρώιμη φάση της ανάπτυξης.
- Τη μέθοδο υπολογισμού της ET_o .

2.4.7. Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις και μοντέλα για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o που έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε μετρημένες μετεωρολογικές παραμέτρους. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικότερες μεθόδους εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

2.4.7.1. Τροποποιημένη μέθοδος των Blaney-Cridle

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο Blaney-Cridle από τη σχέση (Allen and Pruitt, 1986):

$$ET_o = p \cdot (0.46 \cdot T + 8) \quad (2.5)$$

Όπου:

ET_o : Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}).

T: Η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$).

p: Το μέσο ημερήσιο ποσοστό ωρών της ημέρας.

Η βασική μετεωρολογική παράμετρος της μεθόδου αυτής είναι η θερμοκρασία του αέρα. Συνεπώς, η χρήση της δε συνίσταται για ακριβείς υπολογισμούς, ιδίως σε παράκτιες περιοχές (Παπαζαφειρίου, 1984).

Επίσης, σύμφωνα με τον Παπαζαφειρίου (1984) άλλες μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς είναι η τροποποιημένη μέθοδος του Makkink,

η τροποποιημένη μέθοδος του Penman και η τροποποιημένη μέθοδος του εξατμισόμετρου

2.4.7.2. Μέθοδος των Penman-Monteith

Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) των Ηνωμένων Εθνών, έχει προτείνει την δημοφιλή και ευρέως γνωστή εξίσωση των Penman-Monteith, (Allen et al., 1998), ως την πλέον κατάλληλη μέθοδο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o .

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να αξιολογηθεί η εξατμισοδιαπνοή οποιασδήποτε καλλιέργειας χρησιμοποιεί την εξίσωση Penman-Monteith για τον υπολογισμό της τιμής της ET_o .

Η εξίσωση που εκφράζει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o από τους Penman-Monteith είναι:

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2.6)$$

Όπου:

ET_o : Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}).

R_n : Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φυτών ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$).

G : Το ισοζύγιο θερμότητας του εδάφους ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$).

T : Η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα στα 2m ύψος ($^{\circ}\text{C}$).

u_2 : Η ταχύτητα του ανέμου στα 2m ύψος ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

e_s : Η πίεση κορεσμένων ατμών του αέρα (kPa).

e_a : Η πίεση ατμών του πραγματικού αέρα (kPa).

$e_s - e_a$: Το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa).

Δ : Η κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού των ατμών του αέρα ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

γ : Ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

2.4.8. Άμεσες μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής

Οι άμεσες μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής βασίζονται στην άμεση εποπτεία της ποσότητας του νερού που εισέρχεται στο έδαφος με άρδευση ή βροχή. Καθώς επίσης και στην καταγραφή της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών.

Οι βασικότερες άμεσες μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με τον Παπαζαφειρίου (1984) είναι:

1. Μέθοδος των πειραματικών αγροτεμαχίων.
2. Μέθοδος των επαναληπτικών δειγματοληψιών.
3. Μέθοδος του ισοζυγίου της υγρασίας.
4. Μέθοδος του λυσιμέτρου.

2.5. Απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό

Η ποσότητα νερού η οποία απαιτείται για να καλυφθούν οι απώλειες λόγω της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιεργούμενης έκτασης ορίζεται ως απαίτηση της καλλιέργειας σε νερό. Μολονότι οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας και της απαίτησης της καλλιέργειας σε νερό είναι πανομοιότυπες, η απαίτηση της καλλιέργειας σε νερό αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που απαιτείται να προσφερθεί, ενώ η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που χάνεται λόγω της εξατμισοδιαπνοής. Βασικά, η απαίτηση σε νερό άρδευσης αναπαριστά τη διαφορά μεταξύ της απαίτησης της καλλιέργειας σε νερό και της ωφέλιμης βροχόπτωσης (Allen et al., 1998).

Οι απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό μπορούν να καλυφθούν με φυσικό τρόπο, όπως είναι η βροχή, το υπόγειο νερό και το διαθέσιμο εδαφικό νερό το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο στη ζώνη του ριζοστρώματος. Επειδή, όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις οι ανάγκες των καλλιεργειών δε δύνανται να καλυφθούν με φυσικό τρόπο, πρέπει να παρασχεθεί πρόσθετο νερό με άρδευση (Brouwer and Heibloem, 1986; Παπαζαφειρίου, 1984).

Συνεπώς, οι καθαρές απαιτήσεις των καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$I_n = ET_c - P_e - G_w - SM \quad (2.7)$$

Όπου:

I_n : Καθαρές ανάγκες σε αρδευτικό νερό ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$).

ET_c : Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$).

P_e : Το ωφέλιμο μέρος της βροχής ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$).

G_w : Η συμβολή του υπόγειου νερού ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$).

SM : Το νερό στη ζώνη του ριζοστρώματος στην έναρξη της περιόδου καλλιέργειας και είναι διαθέσιμο στις καλλιέργειες ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$).

Για την πλήρη κάλυψη των απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό με άρδευση, εκτός από τις καθαρές ανάγκες σε νερό, απαιτούνται πρόσθετες ποσότητες νερού για την έκλυση των αλάτων του ριζοστρώματος και την αντιμετώπιση των απωλειών που προκύπτουν κατά τη μεταφορά του νερού στο χωράφι.

Άρα, οι συνολικές απαιτήσεις των καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό υπολογίζονται από τη σχέση (Παπαζαφειρίου, 1984):

$$I_t = \frac{I_n}{E \cdot (1 - LR)} \quad (2.8)$$

Όπου:

I_t : Συνολικές απαιτήσεις των καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό (mm day^{-1}).

E : Η αρδευτική αποδοτικότητα.

LR : Ο συντελεστής έκπλυσης αλάτων.

2.5.1. Προγραμματισμός των αρδεύσεων

Η διαθεσιμότητα του νερού είναι ένας μεγάλης σημασίας παράγοντας περιορισμού της αγροτικής παραγωγής στις περισσότερες περιοχές του κόσμου. Έτσι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ανεπαρκής και μη ομοιόμορφες βροχοπτώσεις, η χαμηλή υδατοϊκανότητα των περισσότερων εδαφών και η ευαισθησία των περισσότερων καλλιεργειών στην έλλειψη νερού με επακόλουθες οικονομικές απώλειες, έχουν αποτέλεσμα στην ανάγκη χρήσης άρδευσης.

Αντικείμενο της άρδευσης είναι η διατήρηση μια πλήρους επαρκούς ποσότητας νερού στη ρίζα του φυτού για την κατάλληλη ανάπτυξή του, χωρίς να γίνεται ύγρανση του εδάφους σε επίπεδο κορεσμού, σε τέτοιο βαθμό που ο αέρας να μη μπορεί να φτάσει στις ρίζες. Η εφαρμογή του αρδευτικού νερού πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιείται με τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα από τα φυτά (Brouwer et al., 1990).

Η σημασία του προγραμματισμού των αρδεύσεων είναι μεγάλη. Το βασικό πρόβλημα των αρδεύσεων εντοπίζεται στο πότε απαιτείται άρδευση και σε ποια ποσότητα. Η αποτελεσματική χρήση του νερού βασίζεται στην έγκαιρη εφαρμογή του νερού στην κατάλληλη ποσότητα στον κατάλληλο χρόνο με την κατάλληλη μέθοδο. Εν ολίγοις, προγραμματισμός άρδευσης σημαίνει πότε θα γίνει άρδευση και πόση ποσότητα νερού θα προσφερθεί στην καλλιέργεια.

Σύμφωνα με τον κατάλληλα τροποποιημένο τύπο για μετρικά μεγέθη των Brouwer et al. (1990), ο απαιτούμενος χρόνος για να προσφερθεί η επιθυμητή ποσότητα νερού άρδευσης δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{0.06 \cdot ET_c \cdot A}{Q} \quad (2.9)$$

Όπου:

t: Ο χρόνος άρδευσης (min)

ET_c: Η τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ή το επιθυμητό βάθος άρδευσης (mm·day⁻¹)

A: Το εμβαδό της έκτασης που πρόκειται να αρδευτεί (m²)

Q: Η σταθερή παροχή του νερού (m³·h⁻¹)

Ο κατάλληλος προγραμματισμός άρδευσης ελαχιστοποιεί τα παρακάτω:

- Τη χαμηλή απόδοση της παραγωγής.
- Τη σπατάλη του νερού και της ενέργειας.
- Το κόστος άρδευσης.
- Την έκπλυση των θρεπτικών συστατικών.

- Τη μόλυνση της επιφάνειας των υπογείων υδάτων με χημικά.
- Την απαίτηση στράγγισης.
- Τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

2.6. Μέθοδοι άρδευσης

Οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους εφαρμόζεται αρδευτικό νερό στο έδαφος ονομάζονται μέθοδοι άρδευσης. Οι μέθοδοι αυτοί συνδέονται με τις εδαφικές, κλιματικές και υδρολογικές συνθήκες, την τοπογραφική διαμόρφωση που έχει η επιφάνεια του εδάφους, το είδος των καλλιεργούμενων φυτών και τη γεωργική και τεχνική ανάπτυξης που συντελείται στον τομέα των αρδεύσεων.

Μια άρδευση κρίνεται επιτυχής όταν (Παπαζαφειρίου, 1984; Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 2004):

- Παρέχει στο χωράφι ικανή ποσότητα νερού ώστε η υγρασία που υπάρχει στη ζώνη του ριζοστρώματος να φτάσει στην υδατοϊκανότητα και να εφοδιάσει το έδαφος με ποσότητα νερού ίση με την ωφέλιμη υγρασία.
- Περιορίζει στο ελάχιστο τις επιφανειακές απώλειες από τη βαθιά διήθηση ώστε η αποδοτικότητα της εφαρμογής αρδευτικού νερού να φτάνει στο 100%.
- Εφαρμόζει ομοιόμορφη ποσότητα νερού στην επιφάνεια του αγρού για όσο χρόνο απαιτείται για να διηθηθεί στο έδαφος ποσότητα νερού ίση με την ωφέλιμη υγρασία.

Ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής τους, οι μέθοδοι άρδευσης διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

2.6.1. Επιφανειακή άρδευση

Κατά την επιφανειακή άρδευση το νερό εφαρμόζεται στον αγρό έτσι ώστε να διηθηθεί κατά τη διάρκεια της ροής ή κατά την παραμονή του στην επιφάνεια του εδάφους. Οι μέθοδοι επιφανειακής άρδευσης διακρίνονται στην κεκλιμένη άρδευση και στην οριζόντια άρδευση (Ali, 2011; Παπαζαφειρίου, 1984; Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 2004).

2.6.1.1. Κεκλιμένη άρδευση ή μέθοδος άρδευσης με ροή.

Η κεκλιμένη άρδευση περιλαμβάνει:

- Τη μέθοδο της περιορισμένης διάχυσης ή των παράλληλων λωρίδων
- Τη μέθοδο των αυλάκων

Το νερό στην κεκλιμένη άρδευση εφαρμόζεται στο άκρο των λωρίδων ή των αυλακιών, ρέει στην επιφάνεια του εδάφους και διηθείται μέσα στο έδαφος.

2.6.1.2. Οριζόντια άρδευση ή μέθοδο άρδευσης με κατάκλιση.

Στη μέθοδο αυτή, η επιφάνεια του χωραφιού πρέπει να είναι οριζόντια. Το χωράφι χωρίζεται σε μικρές οριζόντιες λεκάνες, με τη βοήθεια χωμάτινων αναχωμάτων, οι οποίες πληρώνονται με νερό μέχρι αυτό να φτάσει σε βάθος ίσο με το συνολικό βάθος της άρδευσης.

Στη συνέχεια, διακόπτεται η παροχή του νερού και το νερό παραμένει πάνω στη επιφάνεια του εδάφους ακίνητο και διηθείται σιγά-σιγά μέσα στο έδαφος.

Για την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων απαιτούνται:

- Μεγάλη παροχή νερού
- Κατάλληλα προετοιμασμένο προς άρδευση έδαφος.
- Έδαφος χαμηλής υδατοπερατότητας, χωρίς απότομες κλίσεις.

2.6.2. Άρδευση με τεχνητή βροχή

Κατά τη μέθοδο άρδευσης με τεχνητή βροχή ή καταιονισμό, η εφαρμογή του νερού άρδευσης γίνεται σαν απομίμηση της φυσικής βροχής. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία σε όλα τα είδη των καλλιεργούμενων φυτών.

Η διαδικασία του καταιονισμού πραγματοποιείται από ειδικά μηχανικά εξαρτήματα, τα οποία ονομάζονται καταιονιστήρες ή εκτοξευτήρες, και το νερό άρδευσης διασπείρεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του εδάφους (Ali, 2011; Παπαζαφειρίου, 1984).

2.6.3. Άρδευση με σταγόνες

Στη μέθοδο άρδευσης με σταγόνες ή στάγδην άρδευσης, μικρές ποσότητες νερού υπό τη μορφή σταγόνων εφαρμόζονται στο έδαφος. Με τον τρόπο αυτό, ξεχωριστά κάθε φυτό λαμβάνει την απαραίτητη υγρασία η οποία είναι αναγκαία για την κανονική του ανάπτυξη.

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου η διαθέσιμη παροχή άρδευσης είναι μικρή και δε μπορούν να εφαρμοστούν άλλες μέθοδοι άρδευσης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για την άρδευση λαχανικών, αμπελώνων κ.α. καθώς βασικό πλεονέκτημά της είναι η δυνατότητα επέκτασής τους σε άλλες γραμμικές καλλιέργειες (Παπαζαφειρίου, 1984; Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 2004).

3. Αυτόματος έλεγχος σε συστήματα άρδευσης

Μια πιο ορθολογική προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση των αρδεύσεων είναι η χρήση των αυτόματων ελεγκτών άρδευσης. Ο αυτόματος έλεγχος εφαρμόζεται σε όλους σχεδόν τους τεχνικούς τομείς με μεγάλη επιτυχία.

Υπάρχουν γενικά δύο βασικοί τύποι αυτομάτου ελέγχου, ο κλασικός και ο μη κλασικός ή ευφυής έλεγχος.

3.1. Κλασικός αυτόματος έλεγχος

Ο κλασικός αυτόματος έλεγχος βασίζεται στην κλασική θεωρία αυτομάτου ελέγχου, που αναπτύχθηκε από τους Nyquist, Evans και Bode, για την υλοποίηση ελεγκτών και έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε πλήθος εφαρμογών και διαδικασιών, ελέγχοντας κάθε μεταβλητή της εκάστοτε διαδικασίας (Κινγκ 2004).

Για την εφαρμογή της κλασικής θεωρίας αυτομάτου ελέγχου σε ένα σύστημα ή μια διεργασία, βασική προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη του πλήρους μοντέλου του υπό έλεγχο συστήματος. Λόγω της πολύπλοκης φύσης των βιομηχανικών διεργασιών ή και της αδυναμίας λήψης μετρήσεων, η εφαρμογή της κλασικής θεωρίας αυτομάτου ελέγχου είναι σε πολλές περιπτώσεις αδύνατη. Αν υπάρχει διαθέσιμο το μοντέλο του ελεγχόμενου συστήματος, τότε συνήθως χρησιμοποιείται ο ελεγκτής των τριών όρων (PID) (Goodwin et al., 2000).

Ο Bennett (1996) παρουσιάζει μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση του αυτόματου ελέγχου, αν και οι αναφορές στη γεωργία, και ειδικότερα στις αρδεύσεις ακριβείας, είναι περιορισμένες.

Στον τομέα των αυτοματισμών των αρδεύσεων, οι μετρήσεις του εδάφους, των φυτών και των μεταβλητών της ατμόσφαιρας που σχετίζονται με την κατάσταση του νερού των φυτών, μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τις επιδράσεις προηγούμενων δράσεων έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της επόμενης δόσης άρδευσης.

Η θεωρία αυτομάτου ελέγχου αποτελεί ένα διεπιστημονικό υποπεδίο της επιστήμης που ασχολείται με την επιρροή της συμπεριφοράς των δυναμικών συστημάτων. Σε γενικές γραμμές, όταν μια ή περισσότερες μεταβλητές ενός

συστήματος πρέπει να ακολουθήσουν κάποια συγκεκριμένη αναφορά κατά την πάροδο του χρόνου, ένας ελεγκτής δρα στις εισόδους του συστήματος για να ληφθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα στις εξόδους.

Σύμφωνα με τους Dorf και Bishop (2011), σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι ένα σύνολο το οποίο αποτελείται από διασυνδεδεμένα στοιχεία από τα οποία προκύπτει μια συγκεκριμένη διαμόρφωση του συστήματος, που με τη σειρά της εξασφαλίζει την επιθυμητή του απόκριση. Στο πλαίσιο μιας διεργασίας, η σχέση εισόδου/εξόδου είναι μια σχέση αιτίου–αιτιατού (αποτελέσματος). Η εν λόγω διεργασία απαρτίζεται από ένα σύνολο διαδικασιών επεξεργασίας του σήματος εισόδου που στοχεύουν στην παραγωγή μιας μεταβλητής εξόδου η οποία, συχνά, είναι ενισχυμένη κατά κάποιο παράγοντα.

3.1.1. Βασικές στρατηγικές αυτομάτου ελέγχου

Σύμφωνα με τους Zazueta et al. (2008), για τον έλεγχο των συστημάτων άρδευσης χρησιμοποιούνται δύο γενικοί τύποι συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, τα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου και τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

Η διαφορά μεταξύ αυτών των συστημάτων είναι ότι τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου έχουν ανατροφοδότηση (ανάδραση) από αισθητήρες, λαμβάνουν αποφάσεις και εφαρμόζουν τις αποφάσεις αυτές στο σύστημα άρδευσης, δηλαδή, χρησιμοποιούν τις πληροφορίες των συνεπειών των προηγούμενων δράσεων ώστε να υπολογίσουν τις επόμενες. Ενώ τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου ακολουθούν μια προκαθορισμένη δράση, όπως γίνεται με τους χρονοδιακόπτες άρδευσης.

3.1.1.1. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου

Ο πιο απλοποιημένος τρόπος για την εφαρμογή αυτομάτου ελέγχου είναι ο έλεγχος ανοικτού βρόχου (open loop control) στον οποίο δεν χρησιμοποιούνται καθόλου μετρήσεις στις εξόδους του συστήματος για την αντιστάθμιση των εισόδων. Οι ελεγκτές ανοικτού βρόχου ονομάζονται επίσης ελεγκτές χωρίς ανατροφοδότηση. Αυτοί οι τύποι ελεγκτών σχεδιάζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες αρχές:

- Παίρνουν εισόδους και υπολογίζουν εξόδους για το σύστημα αναλόγως.
- Δεν έχουν καμία ανατροφοδότηση για να ελέγχεται αν η επιθυμητή έξοδος ή ο στόχος επιτυγχάνεται ή όχι.



Εικόνα 3.1. Σύστημα ανοικτού βρόχου, χωρίς ανατροφοδότηση. Τροποποιημένη (Romero et al., 2012).

Οι ελεγκτές ανοικτού βρόχου αποτελούν την πιο απλή μορφή ελεγκτών στους οποίους οι βασικές παράμετροι και οι οδηγίες είναι προκαθορισμένες, όπως:

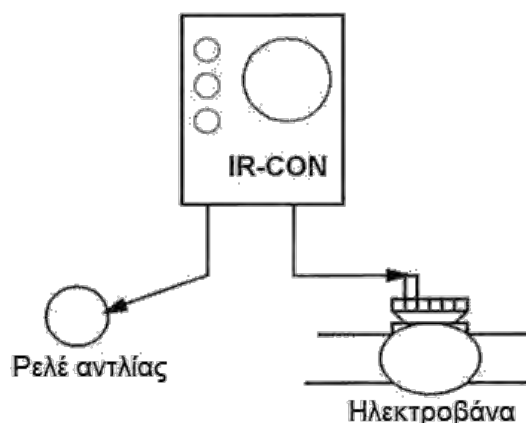
- Πότε να ξεκινήσει το πότισμα ή μια εργασία.
- Πότε να τελειώσει το πότισμα ή μια εργασία.
- Χρονική καθυστέρηση στα μεσοδιαστήματα των αρδεύσεων.

Αυτοί οι ελεγκτές μπορεί μεν να έχουν μικρότερο κόστος, αλλά δεν είναι τόσο καλοί δε ώστε να παρέχουν τη βέλτιστη λύση στα προβλήματα άρδευσης.

Όταν χρησιμοποιείται ένα σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου, η απόφαση για την ποσότητα του νερού καθώς και το χρόνο κατά τον οποίο αυτό το νερό θα πρέπει να αποδοθεί στην καλλιέργεια, λαμβάνεται από τον χειριστή. Στη συνέχεια, ο χειριστής ρυθμίζει τον προγραμματιστή άρδευσης σύμφωνα με το επιθυμητό πρόγραμμα. Αυτές οι συσκευές, οι οποίες απαιτούν εξωτερική παρέμβαση, αναφέρονται υπό όρους αυτομάτου ελέγχου, ως συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου.

Για την επίτευξη των στόχων του ελέγχου, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου χρησιμοποιούν τη χρονική διάρκεια άρδευσης ή τον συνολικό όγκο νερού που παρέχεται στην καλλιέργεια. Στους ελεγκτές ανοικτού βρόχου, οι βασικές παράμετροι ελέγχου είναι το πόσο συχνά και για πόσο καιρό απαιτείται η παροχή του νερού άρδευσης. Συνήθως, οι ελεγκτές ανοικτού βρόχου διαθέτουν ένα ρολόι το οποίο χρησιμοποιείται για την εκκίνηση της άρδευσης. Η παύση της λειτουργίας του συστήματος μπορεί να βασίζεται σε

προρυθμισμένο χρόνο ή στην ποσότητα του παρεχόμενου νερού που περνά μέσα από ένα ροόμετρο (Boman et al., 2015).

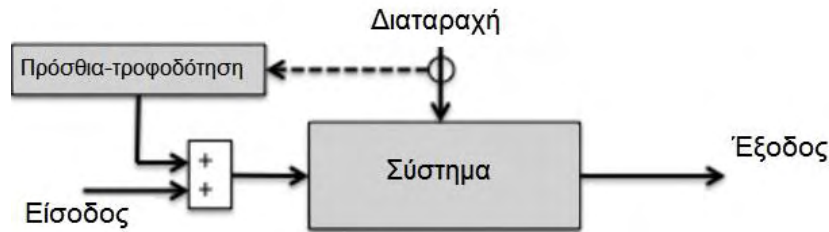


Εικόνα 3.2. Ελεγκτής άρδευσης ανοιχτού βρόχου. Τροποποιημένη (Zazueta et al., 2008, fig. 1).

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου έχουν συνήθως χαμηλό κόστος και είναι άμεσα διαθέσιμα από πολλούς κατασκευαστές. Οι βασικές διαφορές μεταξύ τους εντοπίζονται στη σχεδίαση και την πολυπλοκότητά τους, και συνήθως προσφέρουν ευελιξία σε σχέση με τον αριθμό των ζωνών και τον προγραμματισμό της άρδευσης. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα των συστημάτων ελέγχου ανοικτού βρόχου είναι η αδυναμία τους να ανταποκριθούν αυτόματα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, τα συστήματα αυτά, απαιτούν συχνή επαναρύθμιση για την επίτευξη υψηλών επιπέδων απόδοσης της άρδευσης (Zazueta et al., 2008).

3.1.1.2. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου με πρόσθια-τροφοδότηση

Μια ιδιαίτερη περίπτωση του ελέγχου ανοικτού βρόχου είναι η στρατηγική με πρόσθια-τροφοδότηση (Εικόνα 3.3), στην οποία οι ελεγκτές χρησιμοποιούν γνωστές ή εκτιμώμενες τιμές των μελλοντικών διαταραχών ώστε να αντισταθμίσουν τις επιπτώσεις τους εκ των προτέρων. Το κύριο μειονέκτημα των ελεγκτών ανοικτού βρόχου είναι ότι δεν είναι σε θέση να αντιδρούν σε αλλαγές στις πραγματικές διαταραχές ή στο σύστημα (Romero et al., 2012).



Εικόνα 3.3. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου με πρόσθια-τροφοδότηση. Τροποποιημένη (Romero et al., 2012).

Η στρατηγική ελέγχου της πρόσθιας τροφοδότησης λαμβάνει υπόψη της τις διαταραχές στο σύστημα μετρώντας τις διαταραχές αυτές και προσαρμόζοντας τη δράση του ελέγχου αναλόγως. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι παρακολουθείται η διαταραχή και όχι η ίδια η ελεγχόμενη μεταβλητή ενός συστήματος. Οποιοσδήποτε διαταραχές που δεν έχουν μετρηθεί, δεν λαμβάνονται υπόψη. Όπως και με τον απλό έλεγχο ανοικτού βρόχου, είναι απαραίτητο να υπάρχει διαθέσιμο το μοντέλο του συστήματος προκειμένου να υπολογιστούν οι επιπτώσεις της δράσης του ελέγχου και της μετρούμενης διαταραχής (Horgood, 2012).

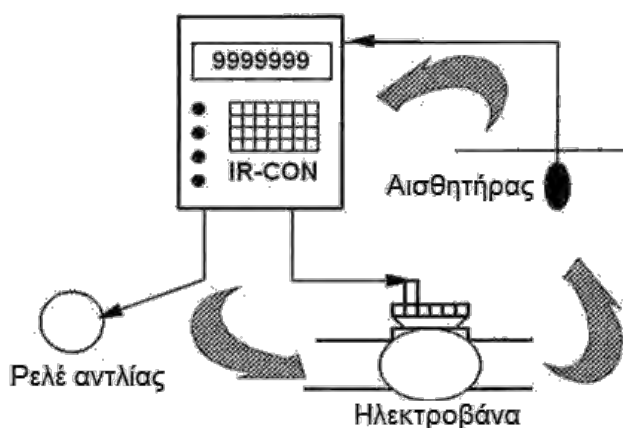
3.1.1.3. Συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου

Βασίζονται σε προκαθορισμένα σενάρια ελέγχου και αξιοποιούν την ανατροφοδότηση του υπό έλεγχο αντικειμένου/συστήματος κατά κάποιο τρόπο. Σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου, ο χειριστής καθορίζει μια γενική στρατηγική για τον έλεγχο και το σύστημα ελέγχου αναλαμβάνει και κάνει λεπτομερείς αποφάσεις για το πότε να εφαρμόσετε το νερό και πόσο νερό να εφαρμόσει.



Εικόνα 3.4. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου. Τροποποιημένη (Romero et al., 2012).

Αυτός ο τύπος του συστήματος απαιτεί ανατροφοδότηση από έναν ή περισσότερους αισθητήρες. Αναλόγως με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, λαμβάνονται κατάλληλες αποφάσεις για άρδευση και διεξάγονται αντίστοιχες δράσεις, εάν κρίνεται απαραίτητο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε αυτού του είδους τα συστήματα η ανατροφοδότηση και ο έλεγχος του συστήματος πραγματοποιείται διαρκώς (Boman et al., 2015).

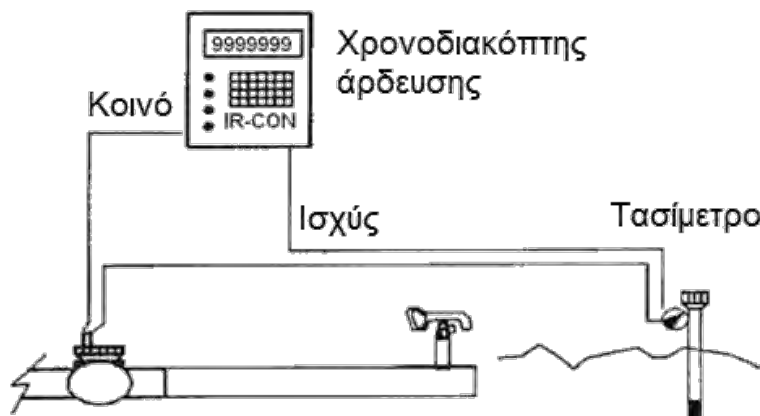


Εικόνα 3.5. Ελεγκτής άρδευσης κλειστού βρόχου με αισθητήρα υγρασίας εδάφους. Τροποποιημένη (Zazueta et al., 2008, fig. 2).

Οι ελεγκτές κλειστού βρόχου απαιτούν τη συλλογή δεδομένων κάποιων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως είναι η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία, η ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία, καθώς επίσης κάποιων παραμέτρων του συστήματος, όπως είναι η πίεση, η παροχή κ.α. Η παρούσα κατάσταση του συστήματος συγκρίνεται έναντι μίας επιθυμητής κατάστασης και βάσει αυτής της σύγκρισης λαμβάνεται μια απόφαση για το εάν πρέπει ή όχι να γίνει άρδευση. Τυπικά, οι ελεγκτές άρδευσης κλειστού βρόχου βασίζουν τις αποφάσεις τους για άρδευση σε αισθητήρες οι οποίοι μετρούν τα επίπεδα της εδαφικής υγρασίας ή χρησιμοποιούν κλιματολογικές παραμέτρους για την εκτίμηση της χρήσης του νερού από τα φυτά.

Κάποιοι ελεγκτές άρδευσης οι οποίοι υπολογίζουν την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας από κλιματικές παραμέτρους και πραγματοποιείται άρδευση σύμφωνα μόνο με την τιμή της εξατμισοδιαπνοής, χωρίς να υπάρχει διαθέσιμη ανατροφοδότηση από μέτρηση της πραγματικής υγρασίας του εδάφους, τότε

αυτοί οι ελεγκτές χρησιμοποιούν τη στρατηγική ελέγχου με πρόσθια τροφοδότηση και όχι με ανατροφοδότηση.



Εικόνα 3.6 Ελεγκτής άρδευσης κλειστού βρόχου υψηλής συχνότητας. Τροποποιημένη (Zazueta et al., 2008, fig. 3).

Η απλούστερη μορφή ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόγχου είναι ενός ελεγκτή υψηλής συχνότητας άρδευσης που διακόπτεται από έναν αισθητήρα υγρασίας. Ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος με την γραμμή που τροφοδοτεί με ρεύμα το σύστημα από τον ελεγκτή μέχρι την ηλεκτροβάννα. Ο αισθητήρας λειτουργεί ως διακόπτης που ανταποκρίνεται στην υγρασία του εδάφους. Όταν επαρκής υγρασία του εδάφους είναι διαθέσιμη στο έδαφος, ο αισθητήρας διατηρεί το κύκλωμα ανοιχτό. Όταν η υγρασία του εδάφους πέσει κάτω από ένα ορισμένο όριο, η συσκευή ανίχνευσης κλείνει το κύκλωμα, επιτρέποντας στον ελεγκτή να τροφοδοτήσει την ηλεκτροβάννα (Boman et al., 2015).

Επίσης, χρησιμοποιούνται συστήματα άρδευσης τα οποία βασίζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μερικά από αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι πολύ εξεζητημένα και να χρησιμοποιούν περίπλοκα μοντέλα προσομοίωσης, επαληθευοντάς τα με τις μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους, ώστε να καταλήξουν σε μια απόφαση για άρδευση και την υλοποίηση της ενέργειας την κατάλληλη στιγμή. Συστήματα αυτού του τύπου, με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας, αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς, και μερικά έχουν καταστεί εμπορικώς διαθέσιμα τα τελευταία χρόνια (Zazueta et al., 2008).

3.1.2. Προγραμματιστές άρδευσης

Στην απλούστερη μορφή τους, οι προγραμματιστές άρδευσης είναι συσκευές οι οποίες συνδυάζουν ένα ηλεκτρονικό ημερολόγιο με ένα ρολόι και εσωκλείονται σε κατάλληλο περίβλημα για την προστασία τους από τις καιρικές συνθήκες.

Συνήθως, ο ελεγκτής διαθέτει μια έξοδο χαμηλής τάσης, τυπικά 12V ή 24V DC ή 24V AC, για την τροφοδοσία των ηλεκτροβανών και των συσκευών ελέγχου συγκεκριμένων ζωνών. Καθ' όλη τη διάρκεια που εφαρμόζεται τάση στην ηλεκτροβάννα παρέχεται νερό άρδευσης.

Οι περισσότερες ηλεκτροβάνες είναι συνήθως κανονικά ανοικτές, το οποίο σημαίνει ότι η βάννα είναι κλειστή μέχρι το πηνίο της να ενεργοποιηθεί από τον προγραμματιστή.

Μια κανονικά ανοικτή ηλεκτροβάννα παραμένει ανοικτή μέχρις ότου ενεργοποιηθεί το πηνίο της. Κανονικά ανοικτές ηλεκτροβάνες χρησιμοποιούνται, μερικές φορές, ως κύριες βάνες σε συστήματα όπου είναι επιθυμητό να υπάρχει κεντρική γραμμή υπό συνεχή πίεση και να διαθέτει μια βασική βάννα η οποία να μπορεί να κλείνει σε περιπτώσεις υπερβολικής ροής ή σε έκτακτες συνθήκες (Boman et al., 2015).

3.1.2.1. Ηλεκτρομηχανικοί προγραμματιστές άρδευσης

Οι ηλεκτρομηχανικοί προγραμματιστές άρδευσης χρησιμοποιούν ένα ηλεκτροκίνητο ρολόι και μηχανικούς μεταγωγείς για την ενεργοποίηση των στάσεων άρδευσης. Αυτοί οι τύποι των ελεγκτών είναι γενικά πολύ αξιόπιστοι και λίγο ευαίσθητοι στην ποιότητα της διαθέσιμης ισχύος.

Σε γενικές γραμμές, δεν επηρεάζονται από αιχμές της ηλεκτρικής ισχύος και θα συνεχίσουν να λειτουργούν υπό οποιοσδήποτε, σχεδόν, συνθήκες (Zazueta et al., 2008).



Εικόνα 3.7. Ηλεκτρομηχανικός προγραμματιστής άρδευσης της εταιρείας Rain Bird (RC-Bi). Available at: <http://www.rainbird.com/> [Accessed 28 Mar. 2016].

Ακόμα και αν υπάρχει διακοπή ρεύματος, το πρόγραμμα άρδευσης δε θα χαθεί. Ωστόσο, εξαιτίας των μηχανικών εξαρτημάτων στα οποία βασίζονται, περιορίζονται στα χαρακτηριστικά που παρέχουν.

3.1.2.2. Ηλεκτρονικοί προγραμματιστές άρδευσης

Ηλεκτρονικοί προγραμματιστές άρδευσης βασίζονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα στερεάς κατάστασης και σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για να παρέχουν τις λειτουργίες του ρολογιού - χρονοδιακόπτη, της μνήμης και του ελέγχου. Αυτού του είδους τα συστήματα είναι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της ηλεκτρικής ενέργειας από τους ηλεκτρομηχανικούς προγραμματιστές και μπορούν να επηρεαστούν από αιχμές, υπερτάσεις και πτώσεις τάσης. Λόγω της εγγενούς ευελιξίας των ηλεκτρονικών συσκευών, οι ελεγκτές αυτοί τείνουν να είναι ιδιαιτέρως ευέλικτοι και παρέχουν έναν μεγάλο αριθμό λειτουργιών σε σχετικά χαμηλό κόστος (Zazueta et al., 2008).



Εικόνα 3.8. Ηλεκτρονικός ελεγκτής άρδευσης της εταιρείας Rain Bird (SST-900i) Available at: <http://www.rainbird.com/> [Accessed 28 Mar. 2016].

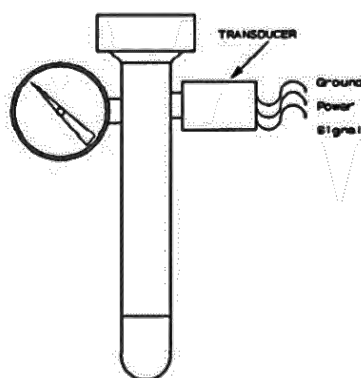
Η εκτέλεση αυτών των λειτουργιών απαιτεί ένα συνδυασμό υλικού και λογισμικού που πρέπει να εφαρμοστούν για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

3.1.3. Αισθητήρες

Ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή τοποθετημένη στο σύστημα η οποία παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα που σχετίζεται άμεσα με την παράμετρο που πρόκειται να μετρηθεί (Boman et al., 2015). Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων, οι συνεχείς και οι διακριτοί αισθητήρες:

α) Συνεχείς αισθητήρες

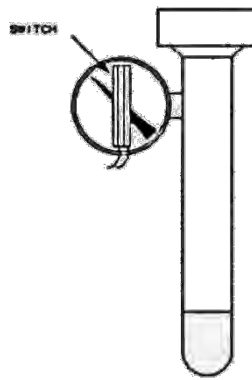
Οι συνεχείς αισθητήρες παράγουν ένα συνεχές ηλεκτρικό σήμα, όπως τάση, ρεύμα, αγωγιμότητα, χωρητικότητα, ή οποιαδήποτε άλλη μετρήσιμη ηλεκτρική ιδιότητα. Οι συνεχείς αισθητήρες χρησιμοποιούνται όταν η κατάσταση λειτουργίας on-off είναι ανεπαρκής.



Εικόνα 3.9. Τενσιόμετρο εξοπλισμένο με μετρητή πίεσης για την παροχή συνεχούς ανατροφοδότησης του δείκτη κατακράτησης νερού εδάφους (Boman et al., 2015, fig. 8).

β) Διακριτοί αισθητήρες

Οι διακριτοί αισθητήρες είναι βασικά διακόπτες, μηχανικοί ή ηλεκτρονικοί, που υποδεικνύουν κατά πόσον υπάρχει κατάσταση εντός ή εκτός λειτουργίας (on-off). Οι διακριτοί αισθητήρες είναι χρήσιμοι για να υποδεικνύουν καταστάσεις, όπως το άνοιγμα και κλείσιμο διατάξεων, όπως είναι οι ηλεκτροβάνες. Επίσης, οι διακριτοί αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν αν ένα όριο μιας σημαντικής μεταβλητής κατάστασης έχει προσεγγιστεί (Zazueta et al., 2008).



Εικόνα 3.10. Τενσιόμετρο εξοπλισμένο με διακόπτη για την παροχή μιας διακριτής κατάστασης on/off της εδαφικής υγρασίας (Boman et al., 2015, fig. 11).

Οι αισθητήρες είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι του βρόχου ελέγχου, επειδή παρέχουν τα βασικά δεδομένα τα οποία οδηγούν ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου. Η κατανόηση της αρχής λειτουργίας ενός αισθητήρα είναι πολύ σημαντική.

Πολλές φορές, οι αισθητήρες δεν αντιδρούν άμεσα στη μεταβλητή που μετράται. Ο ιδανικός αισθητήρας ανταποκρίνεται μόνο στη μετρούμενη μεταβλητή, χωρίς να ανταποκρίνεται σε οποιαδήποτε άλλη μεταβολή του περιβάλλοντος.

Επίσης, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι οι αισθητήρες έχουν πάντα ένα βαθμό ανακρίβειας που συνδέεται με τη φύση τους, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να επηρεάζεται από άλλες παραμέτρους εκτός από τη μετρούμενη μεταβλητή.

Η μέτρηση του ρυθμού ροής στην κεντρική γραμμή είναι από τις πιο βασικές μετρήσεις σε ένα σύστημα άρδευσης. Οι ενδείξεις των αισθητήρων ροής μπορούν να διαβάζονται από απόσταση από ένα σύστημα ελέγχου σχεδιασμένο με αυτή τη δυνατότητα ή με την προσθήκη κατάλληλου συστήματος διεπαφής. Επίσης, χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό το οποίο μπορεί διαρκώς να ελέγχει το ποσοστό ροής στο σύστημα και να το συγκρίνει με προκαθορισμένα αποδεκτά επίπεδα.

Οι αισθητήρες ανέμου μπορούν να αποτρέπουν ή να τερματίζουν την άρδευση αν υπάρχει συνεχής άνεμος. Επίσης, αισθητήρες βροχής μπορούν να αποτρέπουν την άρδευση κατά τη διάρκεια ή μετά από μια έντονη βροχόπτωση.

Οι αισθητήρες εδαφικής υγρασίας μπορούν να αποτρέπουν την άρδευση όταν υπάρχει επαρκής εδαφική υγρασία (Boman et al., 2015).

Στους αισθητήρες μέτρησης υγρασίας του εδάφους, το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από αυτό τον αισθητήρα είναι στενά συνδεδεμένο με την υγρασία του εδάφους, αλλά επίσης, σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και τα διαλυμένα άλατα στο έδαφος.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται με τον αισθητήρα είναι η χρονική απόκριση του. Ένας αισθητήρας πρέπει να μεταφέρει ένα σήμα που αντικατοπτρίζει την κατάσταση του συστήματος στο πλαίσιο του χρόνου που απαιτείται από την εφαρμογή. Χρησιμοποιώντας τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους, ο αισθητήρας θα πρέπει να είναι σε θέση να συμβαδίσει με τις αλλαγές στην υγρασία του εδάφους που προκαλούνται από την εξατμισοδιαπνοή.

Έτσι, η σωστή επιλογή των αισθητήρων και η κατανόηση της αρχής λειτουργίας τους είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος αυτομάτου ελέγχου.

3.1.4. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης που βασίζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή

Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου βασιζόμενο σε υπολογιστή, αποτελούμενο από έναν συνδυασμό υλικού και λογισμικού, δρα ως επόπτης με σκοπό τη διαχείριση αρδευτικών και άλλων συναφών πρακτικών όπως η υδρολίπανση και η συντήρηση. Γενικά, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης που βασίζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση αρδευτικών συστημάτων, διακρίνονται σε δυο κατηγορίες (Boman et al., 2015):

3.1.4.1. Διαδραστικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης

Τα διαδραστικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου συλλέγουν και προωθούν πληροφορίες από διάφορα σημεία του συστήματος, επιτρέποντας τον χειροκίνητο έλεγχο του συστήματος από ένα κεντρικό σημείο μέσω

απομακρυσμένης λειτουργίας των βανών και άλλων συσκευών ελέγχου (Zazueta et al., 2008).

Τα διαδραστικά συστήματα δομούνται συνήθως γύρω από έναν υπολογιστή, είτε προσωπικό υπολογιστή είτε μια ειδικά σχεδιασμένη υπολογιστική μονάδα. Η πληροφορία μεταφέρεται σε μια κεντρική μονάδα, είτε απευθείας από αισθητήρες ή από ενδιάμεσες μονάδες οι οποίες συλλέγουν τα δεδομένα από έναν αριθμό αισθητήρων, στη συνέχεια τα επεξεργάζονται και τα αποθηκεύουν προσωρινά για περαιτέρω μεταφορά στον κεντρικό υπολογιστή.

Τα συστήματα αυτά έχουν δυνατότητες οι οποίες επιτρέπουν στο χειριστή να μεταφέρει εντολές πίσω στις διάφορες μονάδες ελέγχου του αρδευτικού συστήματος. Οι βάνες, οι ρυθμιστές, οι αντλίες κ.α. είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρικά ελεγχόμενους σερβομηχανισμούς οι οποίοι επιτρέπουν την ενεργοποίηση των αντλιών, το κλείσιμο και άνοιγμα των βανών και τη ρύθμιση των βαλβίδων-πιλότων των ρυθμιστών πίεσης. Αυτός ο τύπος συστήματος επιτρέπει στο χειριστή να ελέγχει τη ροή από τον κεντρικό υπολογιστή, ελέγχοντας τις παραμέτρους της ροής όπως είναι η πίεση και ο ρυθμός ροής, σύμφωνα με τις συγκεκριμένες ανάγκες στο δεδομένο χρόνο, και να λαμβάνει άμεση ανατροφοδότηση στην αντίδραση του συστήματος (Zazueta et al., 2008).

3.1.4.2. Πλήρως αυτόματα συστήματα ελέγχου

Τα πλήρως αυτόματα συστήματα ελέγχουν την απόδοση του συστήματος ενεργοποιώντας αυτομάτως αντλίες, βάνες κλπ, ανταποκρινόμενα στην ανατροφοδότηση που λαμβάνεται από το σύστημα εποπτείας. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν έλεγχο κλειστού βρόχου ο οποίος περιλαμβάνει:

- Την παρακολούθηση των μεταβλητών κατάστασης όλου του συστήματος.
- Τη σύγκριση των μεταβλητών κατάστασης με τις επιθυμητές ή τελικές καταστάσεις.
- Τη λήψη απόφασης για ποιες ενέργειες είναι απαραίτητες για να αλλάξουν την κατάσταση του συστήματος.
- Τη διεξαγωγή των αναγκαίων δράσεων .

Για την εκτέλεση των παραπάνω λειτουργιών απαιτείται ο συνδυασμός υλικού και λογισμικού τα οποία θα πρέπει να εφαρμόζονται για κάθε περίπτωση.

Στα πλήρως αυτόματα συστήματα, ο ανθρώπινος παράγοντας εξαλείφεται και αντικαθίσταται από έναν υπολογιστή ειδικά προγραμματισμένο ώστε να αντιδρά κατάλληλα σε οποιεσδήποτε μεταβολή των αλλαγών οι οποίες παρακολουθούνται από τους αισθητήρες. Οι αυτόματες λειτουργίες ενεργοποιούνται από την ανατροφοδότηση των μονάδων στο πεδίο και τις διορθώσεις στις παραμέτρους της ροής, ελέγχοντας τις συσκευές του αρδευτικού συστήματος μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης (Zazueta et al., 2008).



1. Συσκευή επιτόπου επικοινωνίας, αποθήκευσης και ελέγχου,
2. Ελεγκτές ηλεκτροβάνας, αντλίας και περιφερειακών,
3. Τηλεφωνική σύνδεση,
4. Αποκωδικοποιητές αισθητήρων,
5. Συσκευές παρακολούθησης ροής,
6. Συσκευές παρακολούθησης πίεσης και στάθμης νερού,
7. Χειροκίνητος έλεγχος,
8. Σταθεροποιητή τάσης και προστατευτικό υπερτάσεων

Εικόνα 3.11. Πίνακας ελέγχου ενός κεντρικά ελεγχόμενου συστήματος άρδευσης εσπεριδοειδών: (Boman et al., 2015, fig. 14)

Επίσης, τα πλήρως αυτόματα συστήματα μπορούν να εκτελούν βοηθητικές λειτουργίες όπως είναι η παύση της άρδευσης σε περίπτωση βροχόπτωσης, η παροχή οξέος για την εξισορρόπηση του pH (σε περίπτωση άρδευσης από δεξαμενή νερού), η ήχηση συναγερμών κ.α. Τα περισσότερα πλήρως αυτόματα συστήματα ελέγχου περιλαμβάνουν προστασία σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπως είναι η απώλεια του υγρού λόγω ρήγματος των σωληνώσεων.

Οπότε, σε περίπτωση ανάγκης, τα συστήματα αυτά κλείνουν την γενική βάνα όλου του συστήματος ή ενός κλάδου, όταν μια ασυνήθιστη υψηλή ροή ή μια ασυνήθιστη πτώση πίεσης αναφερθεί από τους αισθητήρες.

3.1.5. Επιλογή ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου άρδευσης

Για τον προσδιορισμό του καλύτερου συστήματος ελέγχου για ένα συγκεκριμένο έργο και μια ομάδα διαχείρισης, το πρώτο πράγμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι μια απόφαση η οποία προκύπτει από το συνδυασμό πολλών και διαφορετικών συστημάτων είναι χρονοβόρα. Αν ο τελικός χρήστης ήδη διαθέτει σημαντική εμπειρία, εκπαίδευση ή εξοικείωση με ένα συγκεκριμένο σύστημα αυτομάτου ελέγχου, τότε προφανώς θα λαμβάνει γρήγορες αποφάσεις βασιζόμενες στην εμπειρία (Zazueta et al., 2008).

3.1.6. Κεντρικός έλεγχος άρδευσης

Τα αποθέματα νερού και το αυξανόμενο κόστος της ενέργειας, απαιτούν αυξημένη προσοχή στη διαχείριση του νερού. Ο κεντρικός έλεγχος διαχείρισης δεν είναι μόνο ένα κατάλληλο εργαλείο για τη βελτίωση της διαχείρισης του νερού, καθώς άλλοι στόχοι μπορούν αν επιτευχθούν την ίδια χρονική στιγμή.

Στις μέρες μας, υπάρχουν πολλά διαθέσιμα κεντρικά συστήματα ελέγχου, με διάφορες παραλλαγές, πολλές φορές προσαρμοσμένα στις εκάστοτε γεωγραφικές περιοχές (Zazueta et al., 2008).

Ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου άρδευσης μπορεί απλά να προσδιοριστεί ως ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο ελέγχει διάφορους ελεγκτές, προγραμματιστές, αισθητήρες και άλλες αρδευτικές συσκευές από μια κεντρική θέση.

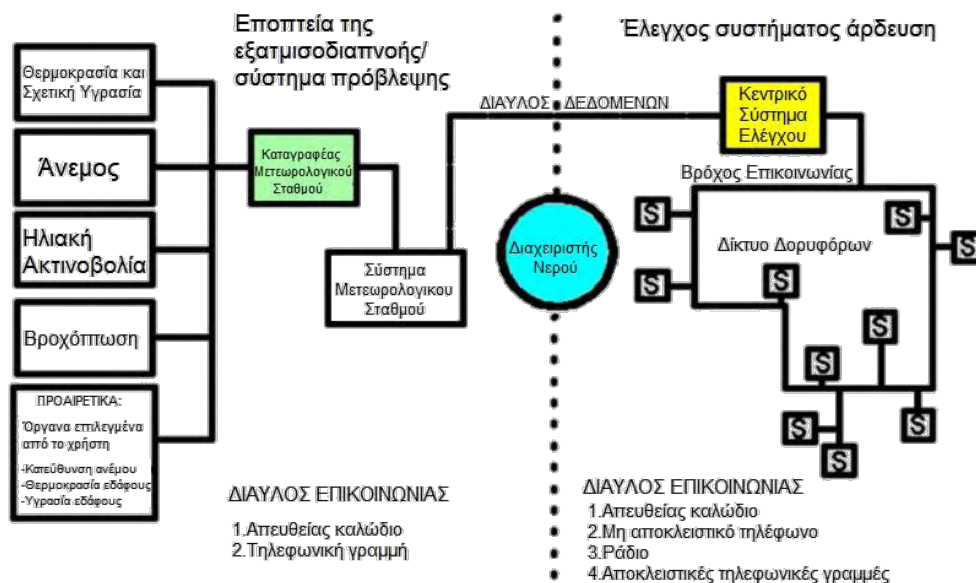
Τα σημερινά κεντρικά συστήματα μπορούν να παρακολουθούν τις συνθήκες ενός συστήματος και του περιβάλλοντά χώρο και στη συνέχεια να ελέγχουν τον εξοπλισμό ώστε να ανταποκρίνεται κατάλληλα στις συνθήκες. Το σενάριο παρακολούθησης και ελέγχου επιτρέπει τον πλήρη αυτοματισμό με προσδιορισμό των παραμέτρων της λειτουργίας του συστήματος ώστε το σύστημα να λειτουργεί χωρίς καμιά παρέμβαση.

Η λειτουργία παρακολούθησης ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου, μπορεί να αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς αισθητήρες όπως αισθητήρες ταχύτητας ανέμου, μετεωρολογικούς σταθμούς, και αισθητήρες βροχής. Οι αισθητήρες αυτοί παρακολουθούν τις αντίστοιχες περιοχές και αναφέρουν τις παρούσες συνθήκες. Το σύστημα μπορεί να αντιδρά αν οποιαδήποτε από τις παραμέτρους βρίσκεται εκτός ορίων.

Ελέγχοντας το σύστημα από την κεντρική τοποθεσία, είναι δυνατό όλες οι λειτουργίες να προγραμματίζονται και να παρακολουθούνται εύκολα και αποτελεσματικά. Δράσεις ελέγχου, όπως είναι η ρύθμιση των χρόνων ποτίσματος σε όλες τις περιοχές σύμφωνα με τις εποχιακές μεταβολές, μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν από έναν μόνο άνθρωπο σε κάθε περιοχή.

Η εικόνα 3.12 αντιπροσωπεύει ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου άρδευσης διασυνδεδεμένο με έναν τοπικό μετεωρολογικό σταθμό ή ένα προσβάσιμο τοπικό δίκτυο μετεωρολογικού σταθμού. Σε συνδυασμό το σύστημα αυτομάτου ελέγχου και το σύστημα διαχείρισης, προσφέρουν τη δυνατότητα προγραμματισμού των αρδεύσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι οποιαδήποτε άλλη προσέγγιση.

Κατά την αναπαράσταση, τα κλιματολογικά δεδομένα συλλέγονται από έναν μετεωρολογικό σταθμό, και η καθημερινή αναφορά του ρυθμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) υπολογίζεται και λαμβάνεται υπόψη σε λήψεις αποφάσεων άρδευσης. Οι αρδεύσεις μπορούν να επαναπρογραμματιστούν καθημερινά ή ακόμη κατά τη διάρκεια του προγράμματος μιας ημέρας, ώστε να αναμένουν μια πιθανή βροχόπτωση, αλλαγές στην εξατμισοδιαπνοή, ή ακόμη υποκειμενικές εκτιμήσεις στο κομμάτι του χειριστή του συστήματος ή του υπευθύνου των αρδεύσεων (Boman et al., 2015).



Εικόνα 3.12. Δομή ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου με είσοδο μετεωρολογικού σταθμού για τον έλεγχο συμβάντων άρδευσης. Τροποποιημένη (Boman et al., 2015, fig. 15).

Στην πραγματικότητα, πολλά κεντρικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να χρησιμοποιούν αυτόματα τα δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής για τον υπολογισμό της χρήσης του νερού στην καλλιέργεια και να πραγματοποιούν ρυθμίσεις ώστε να εκτελούν άρδευση της κάθε ζώνης. Ενώ ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου είναι ικανό να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την άρδευση χωρίς παρεμβάσεις από το προσωπικό. Ένας συνηθισμένος έλεγχος από έμπειρους χειριστές μπορεί να προλάβει την ανάπτυξη σοβαρών προβλημάτων.

3.1.7. Φιλοσοφίες αυτόματων συστημάτων άρδευσης

Η φιλοσοφία ορισμένων συστημάτων ελέγχου περιλαμβάνει ένα σύστημα με ενδιάμεση διαχείριση. Το κεντρικό σύστημα επικοινωνεί με μια τοποθεσία όπου υπάρχει μια μονάδα συγκεντρωτικού ελέγχου (cluster control unit, CCU). Η μονάδα συγκεντρωτικού ελέγχου συνδέεται ενσύρματα ή ασύρματα με έναν δορυφορικό ελεγκτή. Ο δορυφορικός ελεγκτής περιλαμβάνει τους ακροδέκτες όπου τα κοινά καλώδια και τα καλώδια ελέγχου συνδέονται στις βάνες. Ο CCU αποτελείται από έναν υπολογιστή και παρέχει το ρόλο της ενδιάμεσης διαχείρισης στην τοποθέτηση και ιεράρχηση όλων των συνδέσμων επικοινωνίας. Ο CCU περιέχει όλα τα προγράμματα για μια τοποθεσία. Επιπρόσθετα, ο CCU μπορεί να εκτελεί ενέργειες όπως είναι το κλείσιμο βανών

σε συνθήκες υψηλής ροής, χωρίς να επικοινωνεί με τον κεντρικό υπολογιστή (Boman et al., 2015).

Η κεντρική μονάδα επικοινωνεί ασύρματα ή τηλεφωνικά απευθείας με του δορυφορικούς ελεγκτές. Επίσης, η κεντρική μονάδα είναι προγραμματισμένη έτσι ώστε να επικοινωνεί αυτόματα με την τοποθεσία σε κάθε κύκλο άρδευσης. Αυτού του είδους η επικοινωνιακή διαδικασία είναι αμφίδρομη επικοινωνία ανάμεσα στην κεντρική μονάδα και τον δορυφορικό ελεγκτή.

3.1.8. Νέες δυνατότητες συστημάτων ελέγχου άρδευσης

Νέα εντυπωσιακά χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμα στα σημερινά αυτόματα συστήματα άρδευσης, μεταξύ άλλων (Boman et al., 2015):

- Νέα προσέγγιση στην επικοινωνία προσαρμοσμένη στην τοποθεσία.
- Συναγερμοί ή αλφαριθμητικά μηνύματα στέλνονται απευθείας σε βομβητές ώστε να προειδοποιούν το προσωπικό συντήρησης.
- Αυτοματοποιημένη πρόσβαση στους μετεωρολογικούς σταθμούς και αυτόματη χρήση δεδομένων της εξατμισοδιαπνοής.
- Πρόγνωση της κατακρατημένης εδαφικής υγρασίας βασισμένη στη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου του προγραμματισμού της άρδευσης.
- Μεταβλητές κατάστασης δηλωμένες από το χρήστη (if, then, else εντολές) που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συγκεκριμένων συναγερμών.
- Περιβάλλοντα πολυεπεξεργασίας που δημιουργούν τις προϋποθέσεις για σημαντικά διευρυμένες δυνατότητες στο μέλλον.

3.1.9. Λειτουργία των συστημάτων ελέγχου άρδευσης

Οι πληροφορίες που παρέχονται από τα περισσότερα συστήματα άρδευσης είναι, συνήθως, η πίεση και ο ρυθμός ροής. Σε ορισμένα συστήματα, χρησιμοποιούνται επιπλέον παράμετροι, όπως η στάθμη σε ένα κανάλι ή μια δεξαμενή. Οι αισθητήρες οι οποίοι παρέχουν πληροφορίες είναι κυρίως δείκτες πίεσης και ροόμετρα με μετατροπείς προσαρμοσμένους για τηλεμετρία και μικροδιακόπτες για την ένδειξη στάθμης. Σε μικρές αποστάσεις, τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν στον κεντρικό υπολογιστή ως αναλογική έξοδος,

μεταβάλλοντας το ηλεκτρικό δυναμικό. Τέτοιου είδους μεταφορά δεδομένων απαιτεί ξεχωριστή σύνδεση για κάθε αισθητήρα ή διακόπτη κάνοντας την εγκατάσταση ακριβή και πολύπλοκη. Επομένως, στα αυτόματα συστήματα μεγάλων αποστάσεων, τα δεδομένα κωδικοποιούνται κοντά στη μονάδα του μετατροπέα για τη μεταφορά από ένα μονό κανάλι (Zazueta et al., 2008).

Στα συστήματα απευθείας μεταφοράς, η κεντρική μονάδα συλλέγει στιγμιαία δεδομένα, σαρώνοντας τους αισθητήρες, τον ένα μετά τον άλλο. Αναλόγως με τον αριθμό των διαφόρων αισθητήρων, η σάρωση μπορεί να διαρκέσει μερικά ή περισσότερα δευτερόλεπτα, έτσι ώστε τα δεδομένα που λαμβάνονται από έναν συγκεκριμένο αισθητήρα να φτάνουν στον κεντρικό υπολογιστή διακοπτόμενα. Τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στις αναγνώσεις των δεδομένων εξαρτώνται από την ταχύτητα σάρωσης.

Η κεντρική μονάδα λαμβάνει τα δεδομένα από το μέσο όρο τεσσάρων ή πέντε συνεχόμενων αναγνώσεων από τον αισθητήρα, με σκοπό την αποτροπή τυχαίας καταγραφής προσωρινών αιχμών δεδομένων.

Τα επεξεργασμένα δεδομένα μπορούν να απεικονίζονται ψηφιακά ή γραφικά, καθώς βρίσκονται αποθηκευμένα σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης για περαιτέρω αναφορά και εκτύπωση.

3.1.10. Οικονομικά κριτήρια επιλογής συστημάτων ελέγχου άρδευσης

Οι βασικοί παράγοντες οι οποίοι συντελούν στην επιλογή ενός αυτομάτου συστήματός άρδευσης είναι (Boman et al., 2015):

- Παράγοντες του συστήματος ελέγχου.
- Παράγοντες στην επικοινωνία.
- Παράγοντες που αφορούν το υφιστάμενο σύστημα άρδευσης.
- Παράγοντες διαχείρισης.
- Υδατικοί παράγοντες.
- Οικονομικοί παράγοντες.

3.2. Ευφυής έλεγχος

Η κλασική-συμβατική θεωρία αυτομάτου ελέγχου, διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη διαφόρων συστημάτων τα οποία πλέον χρησιμοποιούνται καθημερινά και η παρουσία τους στη ζωή μας θεωρείται δεδομένη, όπως είναι τα τηλέφωνα, ο αυτόματος πιλότος ενός αεροπλάνου, ο αυτόματος έλεγχος της θερμοκρασίας ενός φούρνου κ.α.

Κατά τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια να κατανοηθεί η ανθρώπινη ευφυΐα και να εφαρμοσθεί σε μηχανισμούς εξαγωγής συμπερασμάτων πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου. Η προσπάθεια αυτή έχει οδηγήσει στην εύρεση νέων, μη συμβατικών τεχνικών, οι οποίες βασίζονται πάνω στην ανθρώπινη γνώση και εμπειρία (τεχνητή νοημοσύνη).

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence, AI). Σύμφωνα με τους Feigenbaum και Barr (1981), τεχνητή νοημοσύνη είναι ο κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών που ασχολείται με το σχεδιασμό ευφυών υπολογιστικών συστημάτων, τα οποία σχετίζονται με την ευφυΐα της ανθρώπινης συμπεριφοράς – κατανόηση γλώσσας, μάθηση, επίλυση προβλημάτων κ.α..

Το βασικό πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης ασχολείται με μεθόδους ανάπτυξης συστημάτων τα οποία εμφανίζουν ευφυή συμπεριφορά. Αυτά τα συστήματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να μιμούνται τις ανθρώπινες ικανότητες της σκέψης και των αισθήσεων.

Διακρίσεις της τεχνητής νοημοσύνης αποτελούν τα έμπειρα συστήματα (expert systems), η ασαφής λογική (fuzzy logic) και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks), καθώς επίσης και οι συνδυασμοί τους. Το πεδίο αυτό της επιστήμης είναι γνωστό ως ευφυής έλεγχος.

Όταν δεν είναι διαθέσιμο το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, δεν είναι εφικτό να εφαρμοστούν τεχνικές κλασικού αυτομάτου ελέγχου εφόσον αυτές απαιτούν να είναι γνωστή με ακρίβεια η διεργασία ελέγχου. Σε τέτοιες περιπτώσεις αποτελεί υποτακτική ανάγκη η εφαρμογή του ευφυούς ελέγχου.

Ουσιαστικά, θεμελιώδη αρχή του ευφυούς ελέγχου (intelligent control) αποτελεί η μίμηση του ανθρώπου. Ο βασικός σκοπός του ευφυούς ελέγχου είναι η

εύρεση λύσεων σε προβλήματα αυτομάτου ελέγχου μιας διαδικασίας, ενεργώντας με τρόπο τέτοιο που θα αντιδρούσε ένας άνθρωπος-χειριστής στην ίδια διαδικασία (Κινγκ, 2004).

Τα ευφυή συστήματα αυτομάτου ελέγχου διαφέρουν από τα συμβατικά στο ότι τα ευφυή συστήματα μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις για τον έλεγχο διεργασιών βασισμένες σε εμπειρία, δίχως την ανάγκη ακριβών μαθηματικών μοντέλων του συστήματος. Οι ευφυείς ελεγκτές μπορούν να λειτουργούν υπό συνθήκες αβεβαιότητας και ασάφειας που έχει η ελεγχόμενη διεργασία αλλά και το περιβάλλον τους.

Η βασικότερη επιδίωξη των ασαφών ελεγκτών είναι η αυτονομία. Σύμφωνα με τους Antsaklis και Passino (1993) συστήματα με υψηλό βαθμό αυτονομίας θα πρέπει να είναι ικανά για αυτοδιαχείριση των διεργασιών αυτομάτου ελέγχου.

Η αυτονομία είναι ο στόχος και οι ευφυείς ελεγκτές αποτελούν έναν τρόπο για την απόκτησή της (Antsaklis and Passino, 1993).

Σύμφωνα με τον Κινγκ (2004), ένας απλός λεκτικός ελεγκτής, κάνοντας χρήση μόνο των λεκτικών κανόνων στην βάση γνώσης του για την εξαγωγή αποφάσεων ελέγχου, μπορεί να αντιμετωπίσει επαρκώς οποιεσδήποτε συνθήκες που αυτοί περιέχουν. Όμως, σε αντίθετη περίπτωση δεν είναι σε θέση να εξάγει συμπέρασμα.

Οι ασαφείς ελεγκτές αποτελούν μια κατηγορία των ευφυών ελεγκτών παρέχοντας μηχανισμούς εξαγωγής συμπεράσματος και επιτρέπουν την εξαγωγή αποφάσεων ελέγχου ακόμα και όταν δεν υπάρχουν ορισμένοι κανόνες για συγκεκριμένες συνθήκες της διαδικασίας.

3.2.1. Ευφυείς ελεγκτές

Η βάση γνώσης ελεγχόμενης διεργασίας αποτελεί ξεχωριστό τμήμα από τον μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων. Έτσι, ένας ευφυής ελεγκτής (intelligent controller) έχει την ευελιξία να προσαρμόζεται σε διαφορετικές διεργασίες, μεταβάλλοντας απλώς τη βάση γνώσης του.

Οι ευφυείς ελεγκτές βασίζονται σε λεκτικούς κανόνες (linguistic rules) της μορφής “αν <υποθετικό μέρος> τότε <συμπέρασμα>”. Παράδειγμα ενός λεκτικού κανόνα είναι:

ΑΝ

η Είσοδος 1 είναι Χαμηλή και η Είσοδος 2 είναι Υψηλή

ΤΟΤΕ

η Έξοδος είναι Πολύ Υψηλή

Σύμφωνα με τον Κινγκ (2004), ο ευφυής ελεγκτής έχει στόχο να ενεργεί με τον ίδιο τρόπο που ενεργεί ο άνθρωπος χειριστής, λειτουργώντας με τους ίδιους κανόνες, χωρίς όμως να έχει τα μειονεκτήματα του ανθρώπου.

Οι πιθανές αποκλίσεις που μπορούν να εμφανιστούν στις ελεγχόμενες μεταβλητές μιας διεργασίας ελέγχου μπορούν να αντισταθμιστούν από τους ευφυείς ελεγκτές και η διεργασία να επανέλθει στην κανονική της κατάσταση, χωρίς την παρέμβαση χειριστή.

Συνεπώς, ένας ευφυής ελεγκτής πρέπει να επιτυγχάνει την εκμηδένιση των ανθρώπινων αδυναμιών, όπως η ασυνέπεια, η αναξιοπιστία και η κόπωση και να φθάνει τις ικανότητες του καλύτερου και πιο έμπειρου χειριστή για μια συγκεκριμένη διαδικασία. Το μόνο γνώρισμα που του λείπει σε σύγκριση με έναν άνθρωπο - χειριστή είναι αυτό της εκμάθησης νέων κανόνων (Κινγκ, 2004).

3.2.2. Τεχνικές του ευφυούς ελέγχου

Όπως προαναφέρθηκε, τεχνικές ευφυούς ελέγχου αποτελούν η ασαφής λογική, τα έμπειρα συστήματα, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα καθώς και ο συνδυασμός τους (υβριδικά ευφυή συστήματα).

Η πρώτη τεχνική ευφυούς ελέγχου που αναπτύχθηκε είναι η τεχνική της ασαφούς λογικής (fuzzy logic), η οποία παρουσιάστηκε από τον Zadeh (1965). Κατά την ίδια περίπου περίοδο αναπτύχθηκαν τα έμπειρα συστήματα και στη συνέχεια ακολούθησε η τεχνική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων προς τα τέλη της δεκαετίας του 1980.

3.2.2.1. Έμπειρα συστήματα

Σε γενικές γραμμές, τα έμπειρα συστήματα (expert systems ή knowledge-based systems), αποτελούν συστήματα λογισμικού τα οποία μιμούνται την απόδοση ενός ειδικού-έμπειρου ανθρώπου (expert) σε έναν συγκεκριμένο τομέα.

Σύμφωνα με τον Jackson (1998), στην τεχνητή νοημοσύνη, έμπειρο σύστημα είναι ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο μιμείται την ικανότητα ενός εμπειρογνώμονα στη λήψη αποφάσεων.

Ένα έμπειρο σύστημα είναι ένα σύστημα βάσης γνώσης (knowledge-based system) το οποίο χρησιμοποιεί γνώση για τον τομέα εφαρμογής του και μια διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος στην επίλυση προβλημάτων τα οποία διαφορετικά θα απαιτούσαν ανθρώπινη δεξιότητα ή εμπειρία.

3.2.2.2. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) αντιπροσωπεύονται από αλγόριθμους οι οποίοι συμπεριφέρονται όπως τα νεύρα του ανθρώπινου εγκεφάλου. Θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμα στον ευφυή έλεγχο λόγω, κυρίως, της ικανότητας τους να ενσωματώνουν τη νέα γνώση χωρίς να αλλοιώνουν την παλιότερη και να μαθαίνουν από εμπειρία και όχι από προγραμματισμό ή προτυποποίηση (Βολογιαννίδης, 2006).

Η πρώτη παρουσίαση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (artificial neural networks-ANN) πραγματοποιήθηκε από τους McCulloch και Pitts (1943). Η εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές άρχισε περίπου 40 χρόνια μετά. Από τότε, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εξελίσσονται με ταχείς ρυθμούς και σήμερα αποτελούν σημαντικό πεδίο ανάπτυξης με διάφορες εφαρμογές, όπως στη ρομποτική, την επεξεργασία εικόνας και ομιλίας, στην αναγνώριση στόχου ενός ραντάρ, διαγνώσεις λαθών, μηχανική όραση, συστήματα αναγνώρισης ταυτότητας και ταξινόμησης προτύπων, κ.α. .

3.2.2.3. Ασαφής λογική

Παρόλο που η ασαφής λογική εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1960, όπως προαναφέρθηκε, η αποδοχή της πραγματοποιήθηκε περίπου 10 χρόνια αργότερα.

Κατά την περίοδο εκείνη, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας αλλά και της βιομηχανίας ήταν στραμμένο προς την κλασική θεωρία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, με αποτέλεσμα η τεχνική της ασαφούς λογικής να μην τύχει σημαντικής αποδοχής, ιδίως στις ΗΠΑ.

Η τεχνική της ασαφούς λογικής, εφαρμόστηκε πρώτη φορά σε εργαστηριακό επίπεδο από τον Mamdani (1975). Η συμβολή του Mamdani ήταν τεράστια, καθώς έδωσε το έναυσμα για εφαρμογή της τεχνικής αυτής σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

3.3. Ευφυής έλεγχος με ασαφή λογική

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) εισήχθη στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και η θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy set theory), παρουσιάστηκε από τον Zadeh (1965), αποτελώντας τον θεωρητικό φορέα για την υλοποίηση μιας μεγάλης κατηγορίας ευφυών συστημάτων.

Η βασική εφαρμογή της ασαφούς λογικής βρίσκεται σε συστήματα τα οποία είναι αδύνατο να περιγραφούν με ακρίβεια από μαθηματικά μοντέλα καθώς επίσης και σε συστήματα τα οποία λειτουργούν υπό αβεβαιότητα και στα οποία οι κλασικές τεχνικές αυτομάτου ελέγχου δε μπορούν να εφαρμοστούν.

Η διαρκής τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών συσκευών έχει επιβάλλει την εφαρμογή της ασαφούς λογικής σε πολλές καθημερινά χρησιμοποιούμενες συσκευές όπως κλιματιστικές μονάδες, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, πλυντήρια κ.α.

Καθημερινά χρησιμοποιούνται έννοιες και πληροφορίες οι οποίες είναι ασαφείς και μη ακριβείς όπως “κοντή γυναίκα”, “υψηλή τιμή”, “μεγάλη θερμοκρασία” κ.α.

Κάποιοι λεκτικοί όροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο δε μπορούν να γίνουν κατανοητοί από ένα σύστημα που αντιλαμβάνεται

αριθμούς.

Η ασαφής λογική, παρέχει τη δυνατότητα να αναπαρίστανται οι λεκτικοί όροι από τα ασαφή σύνολα και γεφυρώνει το χάσμα ανάμεσα στον άνθρωπο και την μηχανή.

3.3.1. Ασαφή σύνολα

Η θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy sets) θεωρείται επέκταση της θεωρίας που περιγράφει τα κλασικά σύνολα (crisp sets). Σύμφωνα με την κλασική θεωρία συνόλων, ένα σύνολο μπορεί να αποτελείται από στοιχεία πεπερασμένου ή άπειρου αριθμού. Όλα τα στοιχεία τα οποία περιλαμβάνονται σε όλα τα σύνολα που εξετάζονται ανήκουν στο λεγόμενο υπερσύνολο αναφοράς (universe of discourse) (Κινγκ, 2004).

Σύμφωνα με τον Χαλκίδη (2005) και τους Τζιμόπουλο και Παπαδόπουλο (2013), αν X είναι ένα σύνολο αναφοράς τότε ένα υποσύνολο A του X ($A \subset X$) είναι ένα σύνολο με στοιχεία του X . Έτσι, κάθε υποσύνολο A του X μπορεί να περιγραφεί με τους εξής τρόπους:

α) Με αναγραφή των στοιχείων του A ένα προς ένα.

β) Με περιγραφή του συνόλου A βασιζόμενοι στις ιδιότητες των στοιχείων του.

Έτσι, η χαρακτηριστική συνάρτηση $f_A(x)$ θα έχει τη μορφή:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \in A \\ 0, & \text{αν } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Η χαρακτηριστική συνάρτηση επιστρέφει τιμές μόνο 1 (αληθές) και 0 (ψευδές) αντίστοιχα. Έτσι, το υποσύνολο A συσχετίζεται με κάθε στοιχείο του συνόλου X με μια τιμή που δείχνει αν το στοιχείο αυτό ανήκει στο A ή όχι.

Τέτοιου είδους σύνολα, με δύο μόνο τιμές δηλαδή, λέγονται ευκρινή ή πραγματικά (crisp) σύνολα.

Οποιοδήποτε σύνολο έχει έστω και ένα στοιχείο που δεν κατατάσσεται ούτε μόνο αληθές ούτε μόνο ψευδές ονομάζεται ασαφές σύνολο (fuzzy set).

Σε αυτή τη περίπτωση αντί για τη χαρακτηριστική συνάρτηση υπάρχει μια συνάρτηση συμμετοχής (membership function) που δείχνει το βαθμό συμμετοχής κάθε στοιχείου x στο σύνολο A .

Σε αντίθεση με την κλασική θεωρία συνόλων μια συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου $\mu_A(x)$ μπορεί να έχει ένα αυθαίρετο βαθμό αληθείας στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$ με 0 να θεωρείται μηδενική συμμετοχή και 1 πλήρης συμμετοχή όπως και στα πραγματικά σύνολα.

Συνεπώς, η κλασική θεωρία συνόλων μπορεί να δεχτεί την ασάφεια εφόσον γενικευτεί η μορφή της χαρακτηριστικής συνάρτησης ώστε να μπορεί να λαμβάνει άπειρο αριθμό τιμών στο διάστημα $[0,1]$.

Έστω X υπερσύνολο αναφοράς, τότε ασαφές σύνολο A του X καλείται το διατεταγμένο ζεύγος,

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X, \mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]\} \quad (3.2)$$

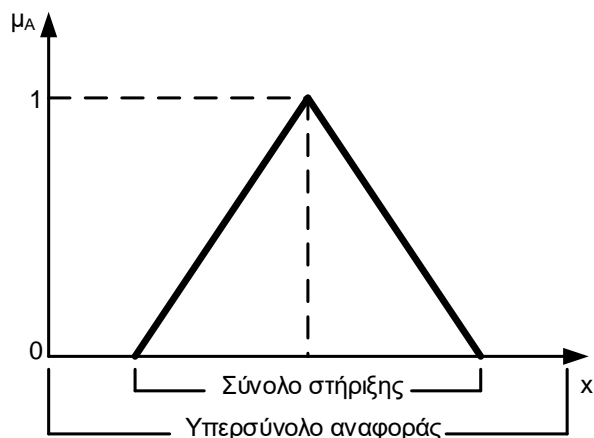
Λέμε τότε ότι τα στοιχεία, x του ασαφούς συνόλου ανήκουν στο υπερσύνολο αναφοράς X , το οποίο είναι το διάστημα τιμών μιας εισόδου του ασαφούς συστήματος.

Η συνάρτηση $\mu_A(x)$ καλείται συνάρτηση συμμετοχής (membership function) και προσδιορίζει το βαθμό, στον οποίο ένα στοιχείο x του υπερσυνόλου αναφοράς X ανήκει στο ασαφές σύνολο A , παίρνοντας τιμές στο διάστημα $[0,1]$.

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0,1] \quad (3.3)$$

Το σύνολο υποστήριξης (support set) ενός ασαφούς συνόλου A είναι το σύνολο των στοιχείων τα οποία έχουν συνάρτηση συμμετοχής διάφορη του μηδενός.

Στην ουσία, ένα ασαφές σύνολο αποτελεί την απεικόνιση του συνόλου στήριξης στο κλειστό διάστημα $[0,1]$.



Εικόνα 3.13. Παράδειγμα τριγωνικού ασαφούς συνόλου (Κινγκ, 2004, fig. 5.2).

3.3.2. Βασικές ιδιότητες ασαφών συνόλων

Αν X είναι ένα σύνολο αντικειμένων, με στοιχεία που συμβολίζονται με το γράμμα x , η συμμετοχή του συνόλου X σε ένα υποσύνολο A είναι μια συνάρτηση συμμετοχής μ_A από το X στο διάστημα $[0,1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 βρίσκεται η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής μ_A , τόσο πιο πολύ το x ανήκει στο A (Zimmermann, 2001).

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (3.4)$$

Κάθε ζευγάρι $(x, \mu_A(x))$ ονομάζεται μονοσύνολο (singleton).

Κάποιες βασικές ιδιότητες των ασαφών συνόλων είναι οι εξής (Hanss, 2005; Pedrycz and Gomide, 2007):

- **Το ύψος ενός ασαφούς συνόλου**

Το ύψος (height) ενός ασαφούς συνόλου A , $\text{hgt}(A)$ είναι το supremum (maximum) των βαθμών συμμετοχής του A και ορίζεται ως:

$$\text{hgt}(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \quad (3.5)$$

Τα ασαφή σύνολα των οποίων το ύψος είναι ίσο με το 1, δηλαδή $\text{hgt}(A)=1$, ονομάζονται κανονικά (normal). Με άλλα λόγια, υπάρχει ένα x για το οποίο ισχύει $\mu_A(x)=1$.

Οποιοδήποτε σύνολο που δεν είναι κανονικό ονομάζεται υποκανονικό (subnormal).

Ένα τέτοιο σύνολο A μπορεί να κανονικοποιηθεί χρησιμοποιώντας το πρότυπο της συνάρτησης κανονικοποίησης (A).

Ορίζεται έτσι ώστε για όλα τα $x \in X$ ισχύει:

$$B = \text{norm}(A) \Rightarrow \mu_B(x) = \frac{\mu_A(x)}{\text{hgt}(A)} \quad (3.6)$$

• Ο κόρος ενός ασαφούς συνόλου

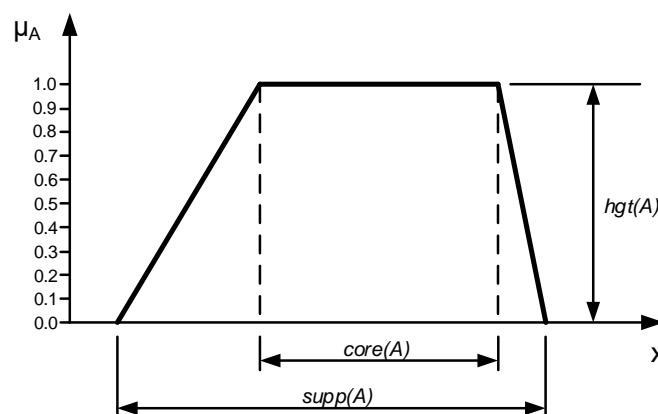
Ο κόρος (core) ενός συνόλου A είναι το πραγματικό-σαφές υποσύνολο του A με βαθμό συμμετοχής ίσο με τη μονάδα, συνεπώς:

$$\text{core}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (3.7)$$

• Η στήριξη ενός ασαφούς συνόλου

Η στήριξη (support) A είναι το πραγματικό-σαφές υποσύνολο του A με μη μηδενικούς βαθμούς συμμετοχής, ισχύει:

$$\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (3.8)$$



Εικόνα 3.14. Ύψος, κόρος και στήριξη ενός ασαφούς συνόλου (Jager, 1995, fig. 2.2).

• Η τομή ενός ασαφούς συνόλου

Η τομή α (α -cut) A_α ενός ασαφούς συνόλου A είναι το πραγματικό-σαφές υποσύνολο του A με βαθμούς συμμετοχής τουλάχιστον α , συνεπώς:

$$A_\alpha = \alpha - \text{cut}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.9)$$

Επίσης, ισχύει ότι:

$$\text{core}(A) = \alpha - \text{cut}(A) \quad (3.10)$$

Παρόλα αυτά, η παρακάτω σχέση δεν είναι πάντα αληθής:

$$\text{supp}(A) = 0 - \text{cut}(A) \quad (3.11).$$

• Πληθάριθμος ενός ασαφούς συνόλου

Πληθάριθμος (cardinality) $\text{card}(A) = |A|$ ενός πεπερασμένου διακριτού ασαφούς συνόλου A είναι το άθροισμα των βαθμών συμμετοχής, συνεπώς:

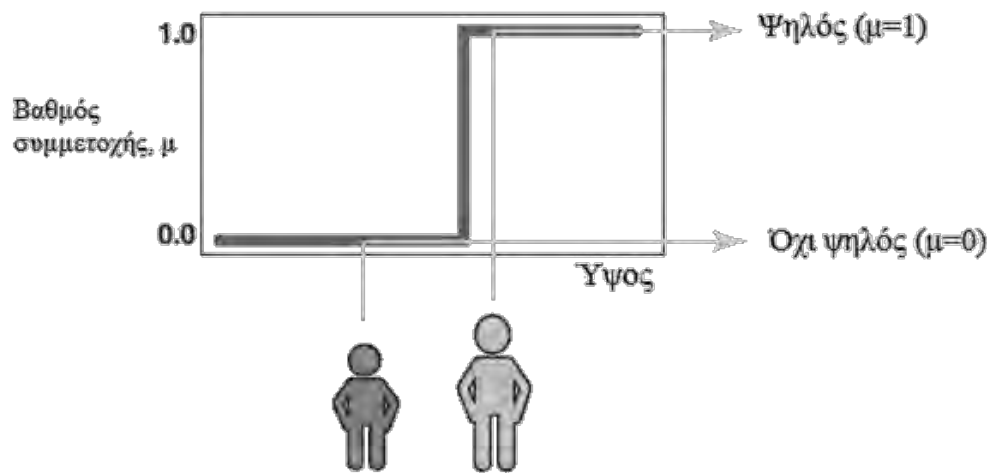
$$\text{card}(A) = |A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x) = \sum_{x \in \text{supp}(A)} \mu_A(x) \quad (3.12)$$

3.3.2.1. Συναρτήσεις συμμετοχής

Μια συνάρτηση συμμετοχής (Membership Function) είναι μια καμπύλη η οποία προσδιορίζει πόσο κάθε σημείο του υπερσυνόλου αναφοράς (universe of discourse) ανήκει σε ένα βαθμό συμμετοχής (Degree of Membership) ανάμεσα στις τιμές 0 και 1 (Klir and Yuan, 1995).

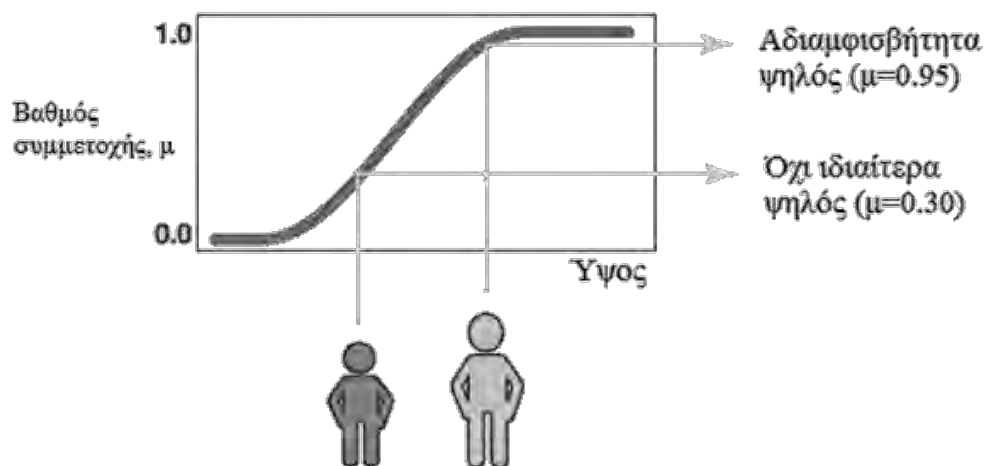
Ένα από τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα παραδείγματα ενός ασαφούς συνόλου είναι το σύνολο των ψηλών ανθρώπων. Στην περίπτωση αυτή, το υπερσύνολο αναφοράς είναι όλα τα δυνατά ύψη, από 1.20 έως 2.5 μέτρα. Η λέξη “ψηλός” θα αντιστοιχεί σε μια καμπύλη η οποία προσδιορίζει το βαθμό στον οποίο οποιοσδήποτε άνθρωπος θεωρείται ψηλός.

Σύμφωνα με τις αρχές των κλασικών συνόλων, για να ορίσουμε το σύνολο των ψηλών ανθρώπων θα πρέπει να θεσπίσουμε μια ορισμένη τιμή ύψους σύμφωνα με την οποία οι άνθρωποι θα διαχωρίζονται σε ψηλούς και κοντούς. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι η τιμή αυτού του ύψους είναι 1.85 μέτρα, τότε κάποιος άνθρωπος με ύψος 1.84 μέτρα θα χαρακτηρίζεται κοντός και κάποιος άλλος άνθρωπος με ύψος 1.86 μέτρα θα χαρακτηρίζεται ψηλός. Ο διαχωρισμός αυτός είναι παράλογος, εφόσον δύο άνθρωποι με αμελητέα διαφορά ύψους έχουν χαρακτηριστεί με δύο αντίθετες μεταξύ τους έννοιες (ψηλός-κοντός) (MathWorks, 2016).



Εικόνα 3.15. Συνάρτηση συμμετοχής με απότομη μεταβολή για την έννοια "ψηλός". Τροποποιημένη (MathWorks, 2016).

Η έννοια “ψηλός” μπορεί να οριστεί επίσης με άλλο τρόπο, χρησιμοποιώντας μια καμπύλη με ομαλή διακύμανση, η οποία μεταβαίνει από την έννοια ψηλός στην έννοια κοντός. Αυτή η καμπύλη αποτελεί τη συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου των ψηλών ανθρώπων. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται αποδεκτό ότι όλοι οι άνθρωποι είναι σε κάποιο βαθμό ψηλοί αλλά όχι όλοι στον ίδιο βαθμό.



Εικόνα 3.16. Συνάρτηση συμμετοχής με ομαλή διακύμανση για την έννοια “ψηλός”. Τροποποιημένη (MathWorks, 2016).

Όπως είναι φυσικό, διάφοροι υποκειμενικοί παράγοντες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά ενός ασαφούς συνόλου.

Συνεπώς, η μορφή που παρουσιάζει η καμπύλης είναι διαφορετική όταν αφορά αγόρια - κορίτσια, γυναίκες-άντρες κλπ. Η μορφή που θα έχει η καμπύλη επιλέγεται αυθαίρετα, αναλόγως πως αντιλαμβάνεται ο καθένας την έννοια “ψηλός”. Τα όρια της συνάρτησης συμμετοχής εντοπίζονται μεταξύ των τιμών $[0,1]$.

Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής θεωρείται ο πιο απλός τύπος. Ο επόμενος εξίσου απλός τύπος συνάρτησης συμμετοχής είναι η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής. Έτσι, τόσο η τριγωνική όσο και η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής, λόγω της απλότητάς τους αποτελούν τις βασικές επιλογές για πολλές εφαρμογές.

Συνοψίζοντας, οι βασικοί τύποι συναρτήσεων συμμετοχής είναι (Jang et al., 1997):

i. Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής.

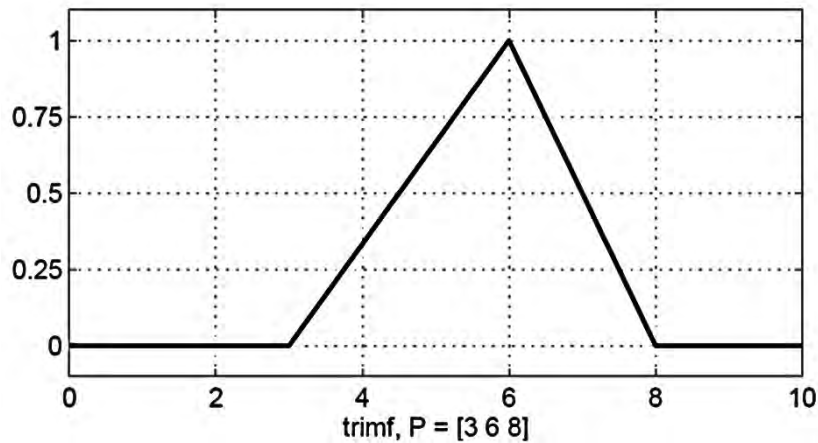
Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής (triangular-shaped membership function) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους $\{a, b, c\}$, και αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{triangle}(x;a,b;c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.13)$$

Επίσης, η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας \min και \max όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\text{triangle}(x;a,b,c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (3.14)$$

Στη σχέση αυτή a , b και c είναι οι κορυφές το τριγώνου. Η Εικόνα 3.17 αποτελεί παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής.



Εικόνα 3.17. Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).

ii. Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής.

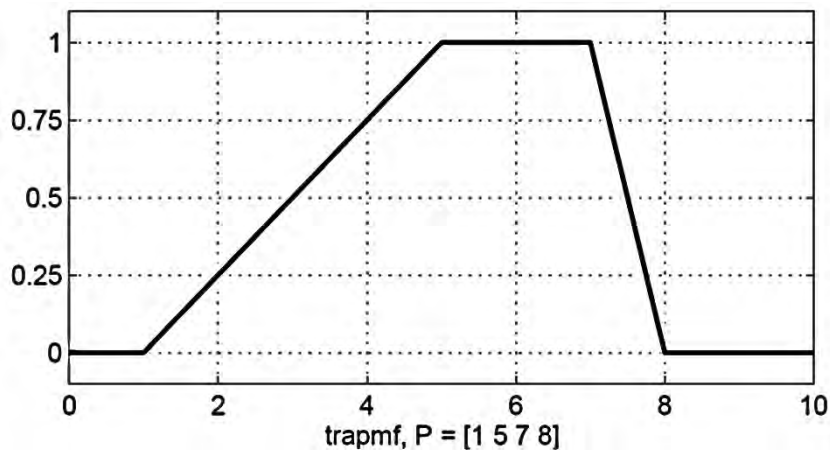
Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής (trapezoidal-shaped membership function) χαρακτηρίζεται από τις τέσσερις παραμέτρους $\{a, b, c, d\}$, και αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3.15)$$

Μια εναλλακτική έκφραση της τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής χρησιμοποιώντας \min και \max περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (3.16)$$

Στη σχέση αυτή a , b , c και d είναι οι κορυφές του τραπεζιού. Η Εικόνα 3.18 αποτελεί παράδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής.



Εικόνα 3.18. Παράδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).

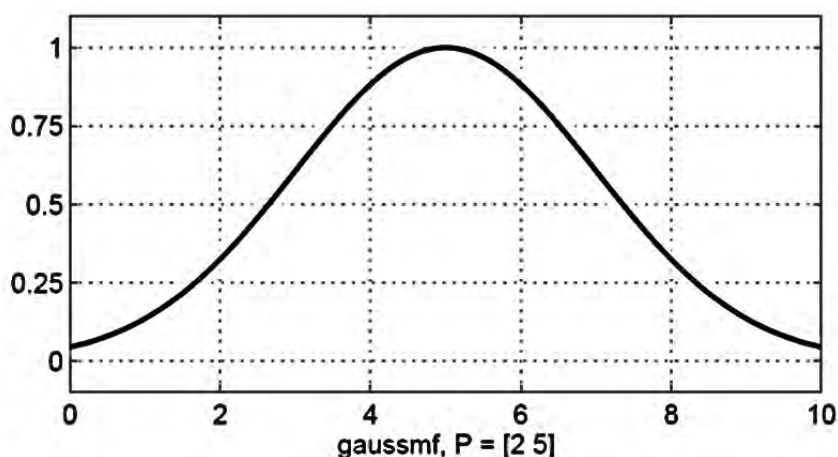
iii. Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής

Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής (Gaussian-shaped membership function) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους $\{\sigma, c\}$, όπου το σ καθορίζει το πλάτος της συνάρτησης συμμετοχής και το c αναπαριστά το κέντρο της.

Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να έχει τη μορφή της καμπύλης Gauss και αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{gaussian}(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (3.17)$$

Η Εικόνα 3.19 αποτελεί παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής.



Εικόνα 3.19. Παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).

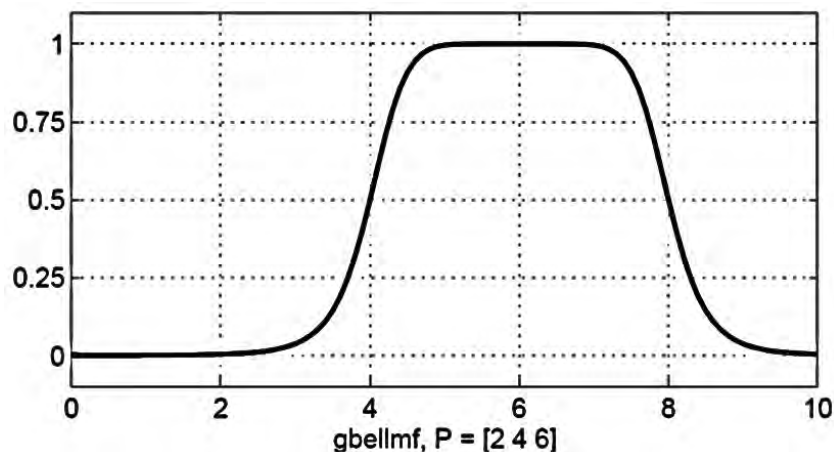
iv. Η γενικευμένη καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής

Η γενικευμένη καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής (generalized bell-shaped membership function) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους {a, b, c}, και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{bell}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (3.18)$$

Στη συνάρτηση αυτή ρυθμίζοντας τις παραμέτρους a και c μεταβάλλονται το κέντρο και το εύρος της συνάρτησης συμμετοχής. Η παράμετρος b καθορίζει τις κλίσεις στα σημεία τομής της καμπύλης και είναι συνήθως θετική.

Η Εικόνα 3.20 αποτελεί παράδειγμα γενικευμένης καμπανοειδούς συνάρτησης συμμετοχής.



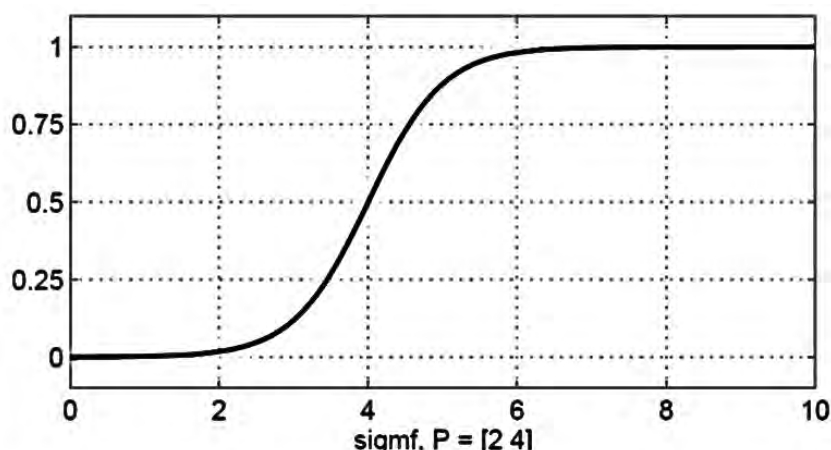
Εικόνα 3.20. Παράδειγμα γενικευμένης καμπανοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).

v. Η σιγμοειδής συνάρτηση συμμετοχής

Η σιγμοειδής συνάρτηση συμμετοχής (sigmoidal-shaped membership function) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους {a, c}, και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{sig}(x; a, c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x - c)]} \quad (3.19)$$

Η Εικόνα 3.21 αποτελεί παράδειγμα σιγμοειδούς συνάρτησης συμμετοχής.



Εικόνα 3.21. Παράδειγμα σιγμοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (MathWorks, 2016).

3.3.2.2. Πράξεις ασαφών συνόλων

Σύμφωνα με τους Κινγκ (2004) και Ross (2010), παρουσιάζονται κάποιες πράξεις ασαφών συνόλων.

Αν η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου A του X είναι μηδενική παντού, τότε το ασαφές σύνολο θεωρείται κενό, δηλαδή:

$$A = \emptyset \quad \text{αν} \quad \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X \quad (3.20)$$

Το συμπλήρωμα (complement) \bar{A} ενός ασαφούς συνόλου εκφράζεται από τη σχέση:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (3.21)$$

Ισότιμα (identical) είναι δυο ασαφή σύνολα όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους είναι παντού ίδιες, δηλαδή:

$$A = B \quad \text{αν} \quad \mu_A(x) \equiv \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.22)$$

Αν η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου B είναι μικρότερη ή ίση με αυτή ενός ασαφούς συνόλου A παντού στο x , τότε το ασαφές σύνολο B είναι υποσύνολο (subset) του A , δηλαδή:

$$B \subseteq A \quad \text{αν} \quad \mu_B(x) \leq \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (3.23)$$

Η ένωση (union) δυο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (3.24)$$

Η τομή (intersection) δυο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (3.25)$$

Το γινόμενο (product) δυο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \bullet \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.26)$$

3.3.2.3. Αλγεβρικές ιδιότητες ασαφών συνόλων

Γενικότερα, στα πραγματικά σύνολα ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες της κλασικής λογικής οι οποίες ισχύουν και για τα ασαφή σύνολα (Ross, 2010; Χαλκίδης, 2005):

1. Ο αυτοπαθής νόμος (Idempotent law)

$$A \cup A = A, \quad A \cap A = A$$

2. Ο αντιμεταθετικός νόμος (Commutative law)

$$A \cup B = B \cup A, \quad A \cap B = B \cap A$$

3. Ο προσεταιριστικός νόμος (Associative law)

$$\begin{aligned} A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap C, \\ A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup C \end{aligned}$$

4. Ο επιμεριστικός νόμος (Distributive law)

$$\begin{aligned} A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap (A \cup C), \\ A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \end{aligned}$$

5. Ο νόμος της διπλής άρνησης (The law of double negation)

$$A = \overline{\overline{A}}$$

6. Ο νόμος του Morgan (De Morgan's law)

$$\begin{aligned} \overline{A \cup B} &= \overline{A} \cap \overline{B}, \\ \overline{A \cap B} &= \overline{A} \cup \overline{B} \end{aligned}$$

3.3.2.4. Λεκτικοί τροποποιητές ή όρια

Πολλές έννοιες που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι στη φυσική τους γλώσσα αναπαρίστανται από ασαφή σύνολα. Χρησιμοποιώντας τις ασαφείς αυτές έννοιες είναι δυνατό να παράγονται άλλες ασαφείς έννοιες χρησιμοποιώντας λεκτικούς τροποποιητές ή όρια (linguistic modifiers or linguistic hedges). Λεκτικά όρια ή τροποποιητές αποτελούν τα "πολύ" (very), "πολύ πολύ" (very very), "ελαφρά" (slightly), "σχεδόν" (rather), "επιπλέον" (plus) και "λιγότερο" (minus). Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους παραπάνω λεκτικούς τροποποιητές ο λεκτικός όρος "ψηλός" παράγει ασαφείς έννοιες όπως "πολύ ψηλός" (very tall), "πολύ πολύ ψηλός" (very very tall), "ελαφρώς ψηλός" (slightly tall) κτλ (Jantzen, 2013; Βολογιαννίδης, 2006).

Άρα, αν "A" ένας λεκτικός όρος και $\mu_A(x)$ η συνάρτηση συμμετοχής του, τότε σύμφωνα με τα παραπάνω οι τροποποιημένοι όροι του που θα παραχθούν, θα έχουν τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής (Jantzen, 2013; Ross, 2010; Βολογιαννίδης, 2006):

- "Very A": $\mu_{\text{veryA}}(x) = \mu_A^2(x)$ (3.27)

- "Very Very A": $\mu_{\text{veryveryA}}(x) = \mu_A^4(x)$ (3.28)

- "Plus A": $\mu_{\text{plusA}}(x) = \mu_A^{1.25}(x)$ (3.29)

- "Minus A": $\mu_{\text{minusA}}(x) = \mu_A^{0.75}(x)$ (3.30)

- "Slightly A": $\mu_{\text{slightlyA}}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}$ (3.31)

3.3.2.5. Ασαφείς κανόνες

Ένας ασαφής κανόνας (if-then rule) είναι στην πιο απλή μορφή του (Jang et al., 1997; MathWorks, 2016):

"If x is A then y is B"

όπου A και B είναι λεκτικές τιμές οι οποίες προσδιορίζονται από ασαφή σύνολα στα υπερσύνολα αναφοράς X και Y, αντίστοιχα. Το τμήμα «If x is A» είναι το τμήμα υπόθεσης (premise part) και το τμήμα «then y is B» είναι το τμήμα συμπεράσματος (consequent part).

Σε γενικές γραμμές, η είσοδος σε έναν if-then κανόνα είναι η παρούσα τιμή της μεταβλητής εισόδου και η έξοδος είναι ένα ολόκληρο ασαφές σύνολο. Στη συνέχεια, το σύνολο αυτό αποασαφοποιείται, προσδιορίζοντας μια τιμή στην έξοδο. Η διαδικασία της αποασαφοποίησης περιγράφεται παρακάτω.

Οι ασαφείς κανόνες αποτελούν υποθετικές προτάσεις και αποτελούν απαραίτητα δομικά στοιχεία συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων.

3.3.3. Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων

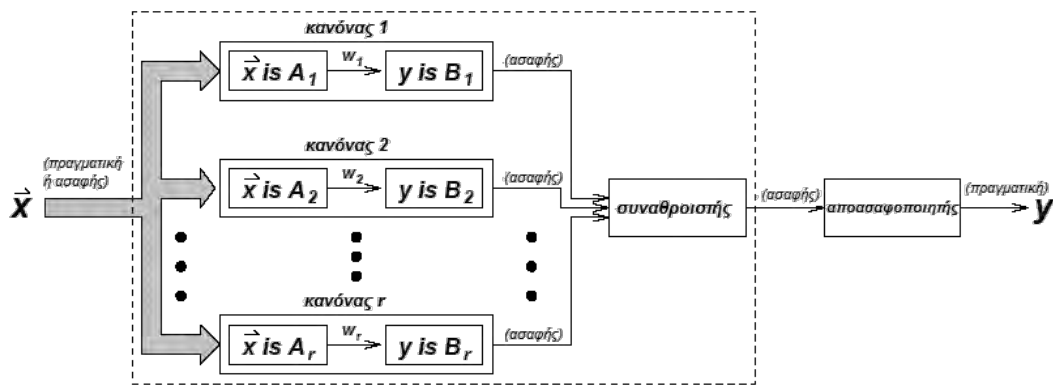
Ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων (fuzzy inference system, FIS) είναι ένα δημοφιλές υπολογιστικό πλαίσιο βασισμένο στις αρχές της θεωρίας ασαφών συνόλων, των ασαφών if-then κανόνων και της ασαφούς συλλογιστικής. Εφαρμόζεται επιτυχώς σε ένα ευρύ πεδίο όπως είναι ο αυτόματος έλεγχος, η ταξινόμηση δεδομένων, η ανάλυση αποφάσεων, τα έμπειρα συστήματα, η πρόβλεψη χρονοσειρών, η ρομποτική και η αναγνώριση προτύπων.

Λόγω της διεπιστημονικής του φύσης, ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων συναντάται με πολλά άλλα ονόματα, όπως σύστημα βασισμένο σε ασαφείς κανόνες (fuzzy-rule-based system), ασαφές έμπειρο σύστημα (fuzzy expert system), ασαφές μοντέλο (fuzzy model), ασαφής λογικός ελεγκτής (fuzzy logic controller) ή ασαφής ελεγκτής (fuzzy controller) κ.α. (Jang et al., 1997).

Ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων μπορεί να δέχεται ασαφείς εισόδους (fuzzy inputs) ή πραγματικές εισόδους (crisp inputs), αλλά οι έξοδοι που παράγει είναι σχεδόν πάντα ασαφή σύνολα.

Συνεπώς, απαιτείται κάποια μέθοδος αποασαφοποίησης για να εξάγει μια πραγματική τιμή η οποία αναπαριστά ένα ασαφές σύνολο.

Ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος με μια πραγματική έξοδο φαίνεται στην Εικόνα 3.22 όπου η διακεκομμένη γραμμή δείχνει ένα βασικό ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος με ασαφή έξοδο, ενώ το μπλοκ της αποασαφοποίησης χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ενός ασαφούς συνόλου εξόδου σε μια πραγματική τιμή (Jang et al., 1997).



Εικόνα 3.22. Μπλοκ διάγραμμα ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπεράσματος (FIS) . Τροποποιημένη (Jang et al., 1997, fig. 4.1).

Ασαφής εξαγωγή συμπερασμάτων είναι η διαδικασία της χαρτογράφησης μιας δεδομένης εισόδου σε μια έξοδο χρησιμοποιώντας ασαφή λογική. Η χαρτογράφηση αυτή παρέχει, στη συνέχεια, μια βάση από την οποία μπορούν να ληφθούν αποφάσεις ή να διακριθούν πρότυπα (MathWorks, 2016).

Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου προτιμάται η έννοια των ασαφών ελεγκτών, η οποία συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι ασαφείς ελεγκτές αποτελούν μια κατηγορία των ευφυών ελεγκτών παρέχοντας μηχανισμούς εξαγωγής συμπεράσματος που επιτρέπουν την εξαγωγή αποφάσεων ελέγχου ακόμα και όταν δεν υπάρχουν ορισμένοι κανόνες για συγκεκριμένες συνθήκες της διαδικασίας.

3.3.3.1. Δομή ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων

Τα τέσσερα βασικά δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων και κατ' επέκταση ένας ασαφής ελεγκτής (fuzzy controller) είναι (Passino and Yurkovich, 1998):

- **Η βάση κανόνων.**

Η βάση κανόνων (rule base) περιλαμβάνει την ανθρώπινη γνώση η οποία αφορά τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να ελέγχεται μια φυσική διεργασία σε μορφή λεκτικών κανόνων. Η έκφραση των κανόνων αυτών γίνεται ποιοτικά ή ποσοτικά, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα για εύκολη προσθήκη,

τροποποίηση και διαγραφή κανόνων η οποία περιλαμβάνει τους κανόνες (if-then rules) για τον έλεγχο της διαδικασίας.

- **Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων.**

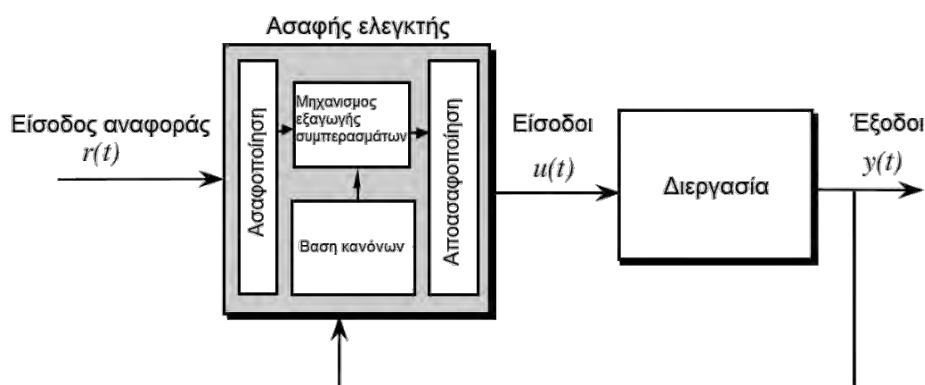
Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων (inference engine ή inference mechanism), μιμείται τη διαδικασία λήψης αποφάσεων ενός εμπειρογνώμονα κατά την ερμηνεία και εφαρμογή της γνώσης όσον αφορά στον καλύτερο δυνατό τρόπο για τον έλεγχο της μονάδας.

- **Η μονάδα ασαφοποίησης.**

Η μονάδα ασαφοποίησης (fuzzification unit) μετατρέπει κάθε τμήμα των δεδομένων εισόδου σε πληροφορίες οι οποίες μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν από το μηχανισμό εξαγωγής συμπεράσματος ώστε εκείνος να ενεργοποιήσει και να εφαρμόσει κανόνες.

- **Μονάδα αποασαφοποίησης.**

Η μονάδα αποασαφοποίησης (defuzzification unit) μετατρέπει τα συμπεράσματα που εξάγει ο μηχανισμός εξαγωγής συμπεράσματος σε πραγματικές εισόδους για τη διεργασία.



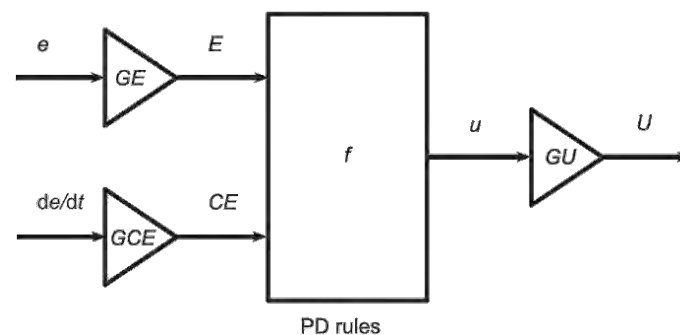
Εικόνα 3.23. Ασαφής ελεγκτής. Τροποποιημένη (Passino and Yurkovich, 1998, fig. 2.1)

3.3.3.2. Η περίπτωση του ασαφούς ελεγκτή PD

Ένας ασαφής ελεγκτής ή ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων μπορεί να δέχεται πολλές εισόδους και να βγάζει πολλές εξόδους (multi-input-multi-output, MIMO) ή να δέχεται μία είσοδο και να βγάζει μια έξοδο (single-

input-single output, SISO). Ο τυπικός ασαφής ελεγκτής SISO ελέγχει ένα σήμα ελέγχου σύμφωνα με ένα σήμα σφάλματος, αλλά παρόλο που στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο είσοδοι, μπορούμε να χαρακτηρίζουμε το σύστημα ως SISO, επειδή η μεταβολή του σφάλματος προκύπτει από το ίδιο το σφάλμα, καθώς είναι η παράγωγος του σφάλματος. Έτσι, συνήθως ο σκοπός του αυτομάτου ελέγχου είναι ο έλεγχος της εξόδου της διεργασίας γύρω από μια τιμή αναφοράς (setpoint) χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή SISO.

Σε έναν ελεγκτή PD, είσοδος της διεργασίας προκύπτει χρησιμοποιώντας το σφάλμα και την παράγωγο του σφάλματος και προσθέτοντας αυτές τις δυο τιμές. Λόγω της δυναμικής διεργασίας, απαιτείται κάποιος χρόνος πριν κάποια μεταβολή του σήματος ελέγχου γίνει αντιληπτή στη διεργασία εξόδου, και ο αναλογικός-διαφορικός ελεγκτής (proportional-derivative controller) χρησιμοποιεί τη διαφορική δράση για την εξομάλυνση των ταλαντώσεων.



Εικόνα 3.24. Γενική μορφή ενός ασαφούς ελεγκτή PD (Jantzen, 2013, fig. 4.3).

Αρχικά, πρέπει να οριστεί μια τιμή αναφοράς (setpoint), όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συνήθως η μεταβλητή που αντιπροσωπεύει την τιμή αναφοράς συμβολίζεται ως $r(t)$. Αυτή η τιμή αποτελεί τον στόχο της εξόδου, δηλαδή ο ελεγκτής θα πραγματοποιεί δράσεις έως ότου η τιμή της εξόδου $y(t)$ γίνει ίση με την τιμή αναφοράς $r(t)$.

Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου, η τιμή αναφοράς και η τιμή της εξόδου οδηγούνται σε έναν συγκριτή. Ο συγκριτής υπολογίζει το προκύπτον σφάλμα (error) $e(t)$, αφαιρώντας την τιμή της εξόδου $y(t)$ από την τιμή αναφοράς $r(t)$.

Έτσι, το σφάλμα $e(t)$ υπολογίζεται από τη σχέση:

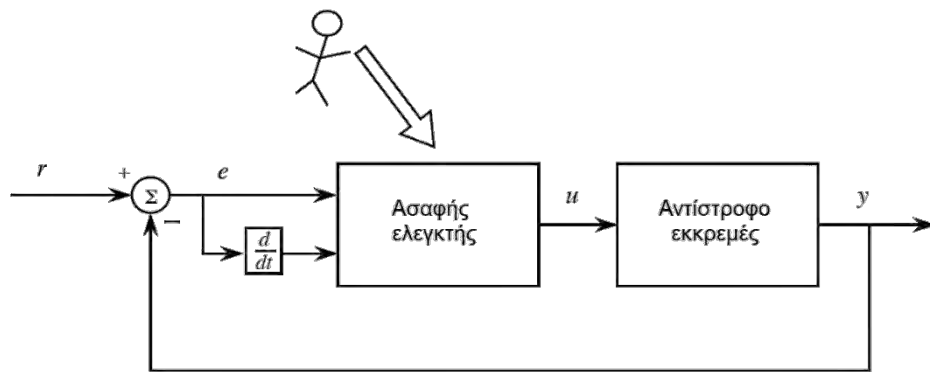
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.32)$$

Το σφάλμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελεί τη μία από τις δυο εισόδους του ασαφούς ελεγκτή PD.

Η δεύτερη είσοδος είναι η μεταβολή του σφάλματος (change-in-error) και προκύπτει από την παραγωγή του σφάλματος. Η μεταβολή του σφάλματος $ec(t)$ δίνεται από τη σχέση:

$$ec(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (3.33)$$

Στην φαίνεται το διάγραμμα ενός ασαφούς ελεγκτή PD για τον έλεγχο ενός αντίστροφου εκκρεμούς.



Εικόνα 3.25. Ασαφής ελεγκτής PD ενός αντίστροφου εκκρεμούς. Τροποποιημένη (Passino and Yurkovich, 1998).

Διαθέτοντας διακριτά υποθετικά μέρη των υπερσυνόλων αναφοράς, είναι πιθανό να προϋπολογιστούν όλες οι δυνατές δράσεις ελέγχου πριν ο ελεγκτής τεθεί εντός λειτουργίας.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός δυσδιάστατου πίνακα, ο οποίος αποτελείται από τα υποθετικά μέρη των υπερσυνόλων αναφοράς των δύο εισόδων, του σφάλματος και της μεταβολής του σφάλματος, και παρέχει συμπεράσματα της εξόδου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς (Jantzen, 2013).

u		ec						
		NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z0
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z0	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	Z0	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	Z0	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	Z0	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	Z0	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Εικόνα 3.26. Παράδειγμα ενός τυχαίου τρισδιάστατου πίνακα εκτίμησης κανόνων ελέγχου ενός ασαφούς ελεγκτή PD.

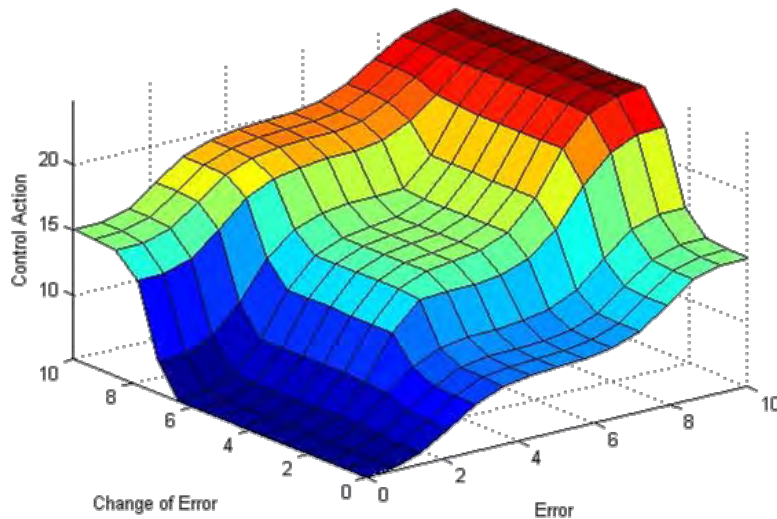
Με δυο εισόδους και μια έξοδο, η χαρτογράφηση εισόδων-εξόδων προκύπτει ως επιφάνεια, η οποία ονομάζεται επιφάνεια ελέγχου. Η Εικόνα 3.27 είναι μια πεπλεγμένη αποτύπωση της σχέσης ανάμεσα στο σφάλμα και τη μεταβολή του σφάλματος, στην πλευρά του υποθετικού τμήματος, και της δράσης ελέγχου *u*, στην πλευρά του συμπεράσματος, όπως προκύπτει από έναν πίνακα κανόνων ελέγχου, σαν εκείνον που φαίνεται στην Εικόνα 3.26.

Οι οριζόντιες εφαπτόμενες των υποθετικών συνόλων προκαλούν οριζόντια επίπεδα στις γωνίες της επιφάνειας. Όταν η διεργασία βρίσκεται στην αναφορά και σε μια μόνιμη κατάσταση, ο ελεγκτής λαμβάνει το σήμα ελέγχου από το κέντρο της επιφάνειας.

Μικρές αποκλίσεις προκαλούν σχετικά μεγάλες μεταβολές του σήματος ελέγχου, καθώς η κλίση είναι σχετικά απότομη. Η απότομη κλίση βοηθά να διατηρηθεί μια, κατά τα άλλα ασταθής διεργασία, σταθερή στην τιμή αναφοράς.

Σε περίπτωση που η ευαισθησία του θορύβου πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, όταν η διεργασία είναι κοντά στην τιμή αναφοράς, προτιμάται ένα άλλο είδος επιφάνειας ελέγχου το οποίο έχει ένα επίπεδο πλάτωμα γύρω από το κέντρο.

Ο σχεδιαστής πρέπει να εξετάσει προσεκτικά την επιλογή της επιφάνειας ελέγχου (Jantzen, 2013).



Εικόνα 3.27. Επιφάνεια ελέγχου ασαφούς ελεγκτή PD (MathWorks, 2016).

3.3.3.3. Τύποι ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων

Τα ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων διακρίνονται σε δυο βασικούς τύπους, Mamdani και Sugeno. Τα δύο αυτά συστήματα διαφοροποιούνται στον τρόπο με τον οποίο προσδιορίζονται οι έξοδοί τους.

- **Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων τύπου Mamdani**

Η ασαφής μέθοδος εξαγωγής συμπερασμάτων του Mamdani αποτελεί την πιο διαδεδομένη μεθοδολογία της ασαφούς λογικής. Η μέθοδος του Mamdani ήταν η πρώτη επιτυχημένη απόπειρα σχεδιασμού ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ασαφών συνόλων. Έτσι, οι Mamdani και Assilian (1975) παρουσίασαν τη μέθοδο αυτή ως μια προσπάθεια ελέγχου ενός συνδυασμού μιας ατμομηχανής και ενός μπόιλερ, συνθέτοντας ένα σύνολο λεκτικών κανόνων ελέγχου οι οποίοι προέκυψαν από έμπειρους ανθρώπους-χειριστές της συγκεκριμένης διεργασίας. Οι ισχυρισμοί του Mamdani βασίστηκαν στην εργασία του Zadeh (1973) η οποία αφορούσε ασαφείς αλγόριθμους για πολύπλοκα συστήματα και διαδικασίες αποφάσεων.

Οι κανόνες της μεθόδου Mamdani, όπως προαναφέρθηκε, είναι της μορφής "If x is A then y is B ". Οι εξαγόμενες συναρτήσεις μεταφοράς της μεθόδου

Mamdani αναμένεται να είναι ασαφή σύνολα.

Ύστερα από τη διαδικασία συνάθροισης (aggregation), υπάρχει ένα ασαφές σύνολο για κάθε μια μεταβλητή εξόδου, το οποίο χρειάζεται αποασαφοποίηση. Η διαδικασία της ασαφούς εξαγωγής συμπερασμάτων αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1^ο Βήμα: Ασαφοποίηση των εισόδων

Το πρώτο βήμα είναι η λήψη των εισόδων και ο προσδιορισμός του βαθμού που ανήκουν αυτοί σε κάθε ένα από τα κατάλληλα ασαφή σύνολα μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής.

Οι τιμές των εισόδων είναι πραγματικές (crisp values), οριοθετημένες από τα υπεрсύνολα αναφοράς των μεταβλητών εισόδου και η τιμές της εξόδου είναι ένας ασαφής βαθμός συμμετοχής του επιλεγμένου λεκτικού συνόλου, πάντα ευρισκόμενες στο μεσοδιάστημα μεταξύ του 0 και του 1.

Στην ουσία, κατά τη διαδικασία της ασαφοποίησης καθορίζεται ο βαθμός κατά τον οποίο οι τιμές των εισόδων ανήκουν στο καθένα από τα ασαφή σύνολα (MathWorks, 2016).

2^ο Βήμα: Εκτίμηση των ασαφών κανόνων

Αφού οι είσοδοι ασαφοποιηθούν, εφαρμόζονται στα υποθετικά μέρη (antecedents) των κανόνων. Αν ένας κανόνας έχει πολλές υποθέσεις, τότε μέσω των τελεστών AND ή OR δίνεται ένας αριθμός που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα της εκτίμησης του μέρους της υπόθεσης.

Αν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής AND τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις: α) Αν ο AND χρησιμοποιείται ως min (τελεστής ελαχίστου Mamdani) τότε δίνεται ο μικρότερος αριθμός (minimum) που εκφράζει την εκτίμηση του κανόνα, ενώ β) αν χρησιμοποιείται ως prod (τελεστής γινομένου Larsen) τότε δίνεται ένας αριθμός που εκφράζει το γινόμενο (product) της εκτίμησης του κανόνα.

Αν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής OR τότε υπάρχουν επίσης δύο περιπτώσεις: α) Αν ο OR χρησιμοποιείται ως max (τελεστής μεγίστου Mamdani) τότε δίνεται ο μεγαλύτερος αριθμός (maximum) της αποτίμησης του κανόνα, ενώ β) αν χρησιμοποιείται ως probor (probabilistic) τότε δίνεται ένας αριθμός που εκφράζει το αλγεβρικό άθροισμα της εκτίμησης του κανόνα.

3^ο Βήμα: Εξαγωγή συμπερασμάτων

Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων ανιχνεύει τους κανόνες στη βάση γνώσης και υπολογίζει το βαθμό συμμετοχής ή εκπλήρωσης των κανόνων αυτών. Πριν την εφαρμογή κάποιας μεθόδου ασαφούς συνεπαγωγής, πρέπει να προσδιοριστεί η βαρύτητα των κανόνων. Κάθε κανόνας έχει μια βαρύτητα που αντιστοιχεί σε έναν αριθμό μεταξύ του 0 και του 1 ο οποίος εφαρμόζεται στον αριθμό που δίνεται από το υποθετικό μέρος. Γενικά, η βαρύτητα αυτή έχει την τιμή 1 και ως εκ τούτου δεν έχει καμία επίδραση στη διαδικασία της ασαφούς συνεπαγωγής.

Κανόνες που έχουν μικρό βαθμό συμμετοχής συμβάλλουν λίγο στο τελικό συμπέρασμα το οποίο διαμορφώνεται κατά βάση από τους κανόνες με μεγάλο βαθμό συμμετοχής.

Ύστερα από την κατάλληλη στάθμιση κάθε κανόνα, η συνεπαγωγή υλοποιείται. Συμπέρασμα είναι ένα ασαφές σύνολο εκπροσωπούμενο από μια συνάρτηση συμμετοχής, η οποία σταθμίζει κατάλληλα τα λεκτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με αυτό. Το συμπέρασμα είναι αναδιαμορφωμένο χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση του υποθετικού μέρους.

Είσοδος της διαδικασίας συνεπαγωγής είναι ένας αριθμός ο οποίος δίνεται από το υποθετικό μέρος και η έξοδος είναι ένα ασαφές σύνολο. Η συνεπαγωγή εμπλέκεται σε κάθε κανόνα.

Στο στάδιο αυτό, το ποσοστό βεβαιότητας του κάθε κανόνα χωριστά καθορίζει το ποσοστό βεβαιότητας για το σύνολο των κανόνων. Αποδίδεται συμπέρασμα των κανόνων της μορφής «Εάν Α τότε Β». Η μονάδα η οποία αντιστοιχεί σε ένα σίγουρο αποτέλεσμα ισούται με το μέγιστο ποσοστό βεβαιότητας. Συνεπώς, το στάδιο αυτό συνδέει τα ποσοστά βεβαιότητας του κάθε κανόνα με τον τελικό βαθμό εκπλήρωσης του κανόνα αυτού. Συνήθως, ο βαθμός εκπλήρωσης αναμένεται μικρότερος της μονάδας.

Σε πολλές περιπτώσεις ασαφών συστημάτων, περισσότεροι από έναν κανόνες είναι δυνατό να οδηγήσουν στο ίδιο αποτέλεσμα αλλά με διαφορετικούς βαθμούς εκπλήρωσης.

4^ο Βήμα: Συνάθροιση

Επειδή οι αποφάσεις βασίζονται στη δοκιμή όλων των κανόνων σε ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος, οι κανόνες πρέπει να συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει κάποια απόφαση. Συνάθροιση (aggregation) ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία τα συμπεράσματα όλων των κανόνων συνενώνονται.

Συγκεκριμένα, οι συναρτήσεις συμμετοχής των συμπερασμάτων συνδυάζονται σε ένα ασαφές σύνολο. Η συνάθροιση πραγματοποιείται μια φορά για κάθε μεταβλητή εξόδου, αμέσως πριν την αποασαφοποίηση (MathWorks, 2016).

5^ο Βήμα: Αποασαφοποίηση

Η αποασαφοποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής του ασαφούς συνόλου σε μία πραγματική τιμή. Όσο κι αν η ασάφεια βοηθά στην αξιολόγηση των κανόνων στα ενδιάμεσα βήματα, η τελική επιθυμητή τιμή κάθε μεταβλητής είναι γενικά απλός αριθμός.

Υπάρχουν, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, πολλές μέθοδοι από-ασαφοποίησης οι οποίες είναι (Klir and Yuan, 1995; Ross, 2010; Zimmermann, 2001):

- I. **Κεντροειδής μέθοδος ασαφοποίησης (Centroid defuzzification ή center of area-COA ή center of gravity-COG)**, όπου υπολογίζεται το κέντρο βάρους της κατανομής του ασαφούς συνόλου της εξόδου:

$$z_o = \frac{\int \mu_i(x) \cdot x dx}{\int \mu_i(x) dx} \quad (3.34)$$

όπου z_o είναι η ασαφοποιημένη έξοδος, μ_i είναι η συνάρτηση συμμετοχής και x είναι η μεταβλητή εξόδου.

- II. **Αποασαφοποίηση μεθόδου διχοτόμησης (bisector defuzzification method)**, η οποία χρησιμοποιεί κάθετη γραμμή που χωρίζει την περιοχή κάτω από την καμπύλη σε δυο ίσες περιοχές.

$$\int_a^z \mu_A(x) dx = \int_z^b \mu_A(x) dx \quad (3.35)$$

- III. Μέθοδος αποασαφοποίησης του μέσου όρου των μεγίστων (Mean of Maxima ή MOM),** η οποία χρησιμοποιεί τη μέση τιμή των συγκεντρωμένων εξόδων των συναρτήσεων συμμετοχής. Στην περίπτωση αυτή, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών εξόδου που έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής:

$$z_o = \frac{\int x dx}{\int dx} \quad (3.36)$$

$$x'_{MOM} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \max \mu(x) \quad (3.37)$$

όπου $x' = \{x; \mu_A(x) = \mu^*\}$

- IV. Αποασαφοποίηση μικρότερου από τους μέγιστους (Smallest of maxima ή SOM),** όπου υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μικρότερο βαθμό συμμετοχής.
- V. Αποασαφοποίηση μεγαλύτερου από τους μέγιστους (Largest of maxima ή LOM),** όπου υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής.
- VI. Μέθοδος σταθμισμένου μέσου όρου (weighted average defuzzification method),** βασίζεται στην τιμή κορυφής καθενός ασαφούς συνόλου και υπολογίζει το σταθμισμένο άθροισμα των τιμών κορυφής.

Σύμφωνα με αυτές τις τιμές κορυφής και το βαθμό συμμετοχής για ασαφή έξοδο, η πραγματική τιμή της εξόδου προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$z_o = \frac{\sum \mu(x)_i \cdot w_i}{\sum \mu(x)_i} \quad (3.38)$$

όπου μ_i είναι ο βαθμός συμμετοχής

Συνοψίζοντας, είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η κεντροειδής μέθοδος αποασαφοποίησης, εξαιτίας της ικανότητάς της να παρουσιάζει το πιο μικρό σφάλμα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους.

- **Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων τύπου Sugeno**

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ασαφής μέθοδος εξαγωγής συμπερασμάτων Sugeno ή Takagi-Sugeno-Kang. Παρουσιάστηκε από τον Sugeno (1985) και είναι παρόμοια με τη μέθοδο Mamdani από πολλές απόψεις. Τα πρώτα δυο μέρη της διαδικασίας εξαγωγής ασαφούς συμπερασμάτων, δηλαδή η ασαφοποίηση των εισόδων και η εφαρμογή ασαφών τελεστών είναι η ίδια.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους Mamdani και Sugeno είναι ότι οι συναρτήσεις συμμετοχής της μεθόδου Sugeno είναι είτε γραμμικές είτε σταθερές.

Ένας τυπικός κανόνας ενός ασαφούς μοντέλου Sugeno έχει τη μορφή:

If Input 1 = x and Input 2 = y, then Output is $z = ax + by + c$

Η τελική έξοδος του συστήματος είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος όλων των κανόνων εξόδου και υπολογίζεται από τη σχέση (MathWorks, 2016):

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.39)$$

4. Ανασκόπηση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου άρδευσης

4.1. Συμβατικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης

Ο συμβατικός έλεγχος βασίζεται στην κλασική θεωρία αυτομάτου ελέγχου, που αναπτύχθηκε από τους Nyquist, Evans και Bode, για την υλοποίηση ελεγκτών και έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε πλήθος εφαρμογών και διαδικασιών, ελέγχοντας κάθε μεταβλητή της εκάστοτε διαδικασίας (Κινγκ, 2004).

Η διαρκής βελτίωση στην αποδοτικότητα της χρήσης του νερού υπάρχει από το 1960, η οποία επιτυγχάνεται με τον προγραμματισμό της άρδευσης σύμφωνα με κλιματικές παραμέτρους, το δυναμικό σε νερό των φυτών και τη μετρούμενη περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους.

Οι Gravalos et al. (2007) πραγματοποίησαν μια σύντομη ανασκόπηση ορισμένων πολύ βασικών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου άρδευσης. Διάφορα συστήματα με τα οποία τα φυτά θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε σταθερή περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους περιγράφονται από τους Waugh και Corey (1963).

Οι Fischbach et al. (1970) ανέπτυξαν ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης που χρησιμοποιεί τενσιόμετρα. Ένα από τα μειονεκτήματα του τενσιόμετρου είναι ότι δεν μπορεί να ακολουθήσει τις ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες του νερού του εδάφους. Ένας αισθητήρας υδατικού δυναμικού (matric potential sensor), ο οποίος βασίζεται στην αρχή θερμικής διάχυσης σε πορώδες μέσον, αναπτύχθηκε από τους Phene et al. (1971). Παρουσιάζει ευαισθησία σε μεγάλη περιοχή του υδατικού δυναμικού και παράγει στην έξοδό του ηλεκτρικό σήμα, που μπορεί να αξιοποιηθεί στην αυτοματοποίηση των αρδεύσεων.

Ο Cuming (1990) ανέπτυξε ένα σύστημα ελέγχου άρδευσης, το οποίο περιλαμβάνει έναν αισθητήρα υγρασίας του εδάφους και ελέγχει τις κοινές γραμμές διαφόρων συστημάτων άρδευσης. Ένας χρονοδιακόπτης ενεργοποιείται οποτεδήποτε ο αισθητήρας υγρασίας του εδάφους που

τοποθετείται στο ριζικό σύστημα του επιτρέπει να ποτίζονται. Οι Frankovitch και Sarich (1991) ανέπτυξαν ένα σύστημα αυτόματου ποτίσματος φυτών που αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα μεταγωγής που ελέγχει το χρόνο της άντλησης. Ο ρυθμός ροής του νερού ελέγχεται από ένα σύστημα βανών.

Ο Stenitzer (1993) παρουσίασε προτάσεις για προγραμματισμό των αρδεύσεων με γύψινα πλακίδια. Ένα πιλοτικό πλακίδιο που τοποθετείται σε βάθος 20-40 εκατοστών υποδεικνύει την ανάγκη για άρδευση. Ένα δεύτερο πλακίδιο ελέγχου, σε βάθος 60-70 εκατοστών, σηματοδοτεί τις απώλειες διήθησης ως αποτέλεσμα των πολύ υψηλών δόσεων άρδευσης. Τα γύψινα πλακίδια έχουν μικρή σφαίρα επιρροής και έτσι δίνουν τις μετρήσεις του νερού του εδάφους σε ένα σημείο.

Οι Malicki και Skierucha (1989) περιγράφουν την αρχή λειτουργίας ενός απλού, και ρυθμιζόμενο ανακλασίμετρο στο πεδίο του χρόνου (TDR), για μετρήσεις στο νερό του εδάφους, το οποίο λειτουργεί με παλμό βελόνας 300 PS χρόνο ανόδου. Οι Lukangu et al. (1999) έλαβαν εργαστηριακές και επιτόπιες μετρήσεις της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους, χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα ανακλασιμετρίας στο πεδίο της συχνότητας (FDR) να προβλέψει την έναρξη και τη λήξη της άρδευσης.

Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν καταστήσει διαθέσιμους τους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας για την αποτελεσματική και αυτόματη λειτουργία των αρδευτικών συστημάτων (Dukes and Scholberg, 2005). Οι αυτόματες αρδεύσεις βασισμένες σε αισθητήρες εδαφικής υγρασίας επιδιώκουν τη διατήρηση ενός επιθυμητού εύρους εδαφικού νερού, το οποίο είναι το βέλτιστο για την ανάπτυξη των φυτών, στη ζώνη της ρίζας (Irmak and Haman, 2001). Η τελική επιθυμητή κατάσταση εδαφικού νερού συνήθως εκφράζεται σε όρους ογκομετρικής υγρασίας.

Σε προηγούμενη έρευνα, οι (Dukes et al., 2003) βρήκαν ότι εφόσον ένα τέτοιο σύστημα ρυθμιστεί και αξιολογηθεί, μόνο εβδομαδιαία παρατήρηση είναι απαραίτητη. Το σύστημα αυτού του τύπου λαμβάνει υπόψη την ποσότητα του νερού που εφαρμόζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του φυτού και τις πραγματικές κλιματολογικές συνθήκες της εποχής. Εκτός από την ευκολία που παρέχει στο διαχειριστή, το σύστημα αυτό εξοικονομεί σημαντικές ποσότητες νερού σε

σύγκριση με συστήματα αυτόματης άρδευσης που βασίζονται σε μέσες ιστορικές κλιματολογικές συνθήκες.

Επίσης, οι Stone et al. (1985) παρουσίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης, βασισμένο σε υπολογιστή, για τη συνεχή μέτρηση του υδατικού δυναμικού του εδαφικού νερού. Οι Meron et al (2001) χρησιμοποίησαν ένα σύστημα ελέγχου για την άρδευση μηλιάς χρησιμοποιώντας τενσιόμετρα.

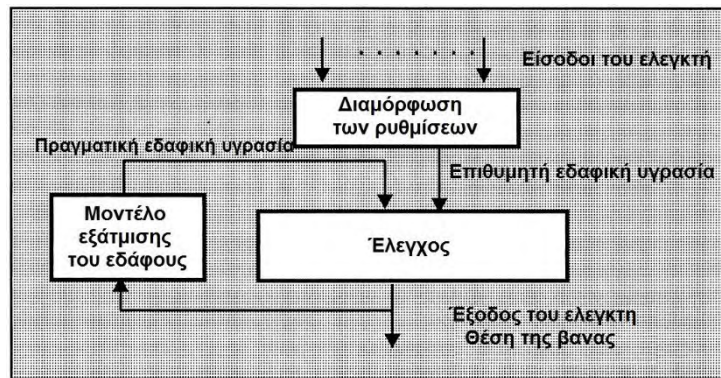
4.2. Ευφυή συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρδευσης

4.2.1.1. Ευφυής έλεγχος άρδευσης με ασαφή λογική

Σε διάφορες γεωργικές εφαρμογές και ιδιαιτέρως στις αρδεύσεις, η εφαρμογή συστημάτων τα οποία βασίζονται σε ασαφή μοντέλα είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη μελλοντικών διαταραχών, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες ή η ζήτηση του νερού. Η ασαφής λογική έχει το πλεονέκτημα ότι η λύση του προβλήματος μπορεί να προσαρμοστεί με όρους οι οποίοι μπορούν εύκολα να γίνουν κατανοητοί από τον άνθρωπο, έτσι ώστε η εμπειρία των ανθρώπων αυτών δύναται να αξιοποιηθεί κατά το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα της εκμηχάνισης εργασιών οι οποίες προηγουμένως πραγματοποιούνταν από τον άνθρωπο, όπου στην παρούσα περίπτωση πρόκειται για τις αρδεύσεις (Romero et al., 2012).

Οι Bahat et al. (2000) παρουσίασαν ένα ελεγκτή άρδευσης που βασίζεται σε ασαφή λογική. Πρόκειται για ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου το οποίο δέχεται ανατροφοδότηση από έναν ή περισσότερους αισθητήρες τοποθετημένους στο χωράφι, οι οποίοι συνεχώς στέλνουν στον ελεγκτή ανανεωμένα δεδομένα όπως το ποσοστό εδαφικής υγρασίας, η θερμοκρασία κ.α.. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μοντέλο του εδάφους, εκφρασμένο στο πεδίο της συχνότητας, ως συνάρτηση μεταφοράς.

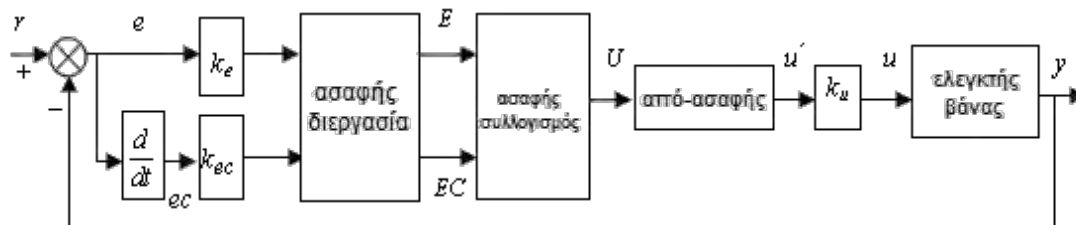
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα είναι σθεναρό και μπορεί να λειτουργεί υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί πρότυπη μελέτη πάνω στην οποία έχουν βασιστεί πολλοί ερευνητές για την ανάπτυξη ευφυών ελεγκτών άρδευσης με ασαφή λογική. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος.



Εικόνα 4.1. Μπλοκ διάγραμμα του ασαφούς ελεγκτή και μοντέλου του συστήματος. Τροποποιημένη (Bahat et al., 2000, fig. 1).

Οι Zhang et al. (2009) παρουσίασαν έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής για άρδευση καλλιεργειών βάμβακος. Το σύστημα αποτελείται από έναν κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, έναν δεύτερο ηλεκτρονικό υπολογιστή ελεγκτή, μια μονάδα επικοινωνίας, αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας, ελεγκτές ηλεκτροβανών και λογισμικό. Για τον έλεγχο του χρόνου άρδευσης και της ποσότητας άρδευσης των καλλιεργειών βάμβακος κατασκευάστηκε μοντέλο ασαφούς ελέγχου.

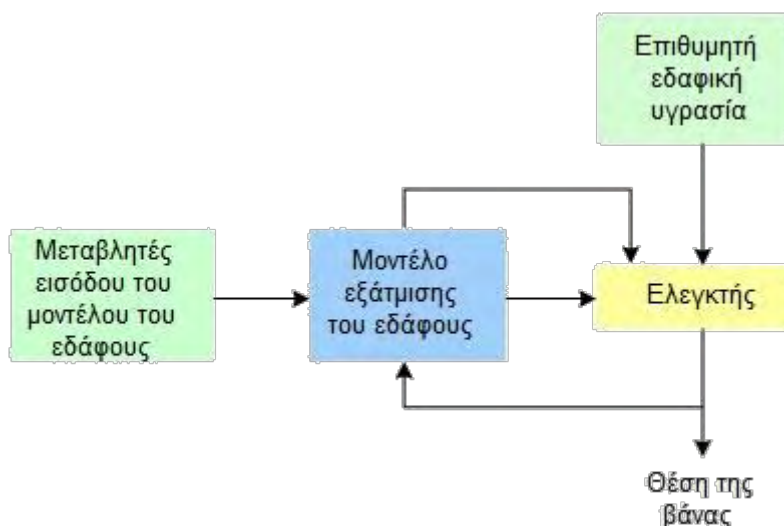
Σύμφωνα με τους κανόνες υδατικών απαιτήσεων για διαφορετικά στάδια της καλλιεργητικής περιόδου, διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου μπορούν να εκτελούνται αυτόματα. Τα αποτελέσματα αυτού του συστήματος ακριβούς άρδευσης έδειξαν ότι μπορεί να αυξήσει την παραγωγή και να εξοικονομήσει πολύ περισσότερο νερό σε σχέση με έναν απλό ON-OFF ελεγκτή. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα του συγκεκριμένου ασαφούς ελεγκτή.



Εικόνα 4.2. Δομή του ασαφούς ελεγκτή. Τροποποιημένη (Zhang et al., 2009, fig. 2).

Οι Javadikia et al. (2009) πρότειναν ένα σύστημα άρδευσης βασισμένο σε έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής. Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής βασίζεται σε έναν ελεγκτή Mamdani και είναι κατασκευασμένο στο λογισμικό MATLAB. Το

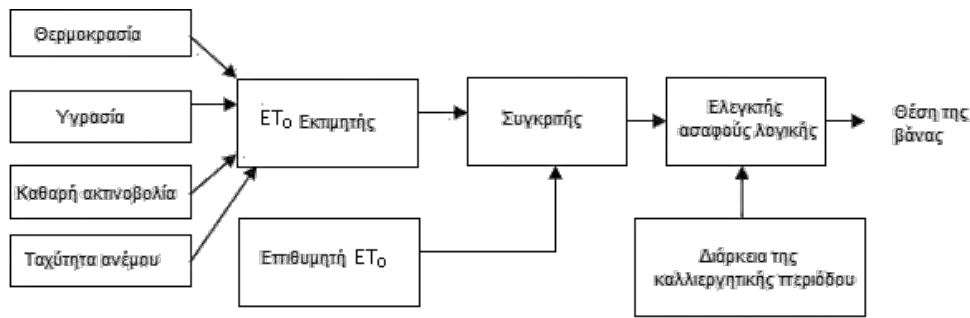
μοντέλο του ελεγκτή ασαφούς λογικής εκτιμά αποτελεσματικά την ποσότητα πρόσληψης νερού για τα φυτά σε ικανοποιητικό βάθος χρησιμοποιώντας το αξιόπιστο μοντέλο άρδευσης, τις λειτουργίες της εξατμισοδιαπνοής, τις περιβαλλοντικές συνθήκες του θερμοκηπίου, τον τύπο του εδάφους και το είδος του φυτού. Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται το διάγραμμα του συστήματος.



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα μπλοκ και μοντέλο συστήματος του ελεγκτή άρδευσης. Τροποποιημένη (Javadikia et al., 2009, fig. 1).

Στην εργασία των Rahangadale και Choudhary (2011), παρουσιάζεται ένα σύστημα άρδευσης το οποίο αρχικά εκτιμά τις ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό με τη χρήση της εξίσωσης του FAO Penman-Monteith και εφαρμόζει ένα μοντέλο ελεγκτή άρδευσης, πραγματοποιώντας ευφυή έλεγχο με κανόνες ασαφούς λογικής. Η εκτιμώμενη εξατμισοδιαπνοή συγκρίνεται με την επιθυμητή εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών. Αρχικά, μοντελοποιείται ένας συμβατικός on-off ελεγκτής άρδευση.

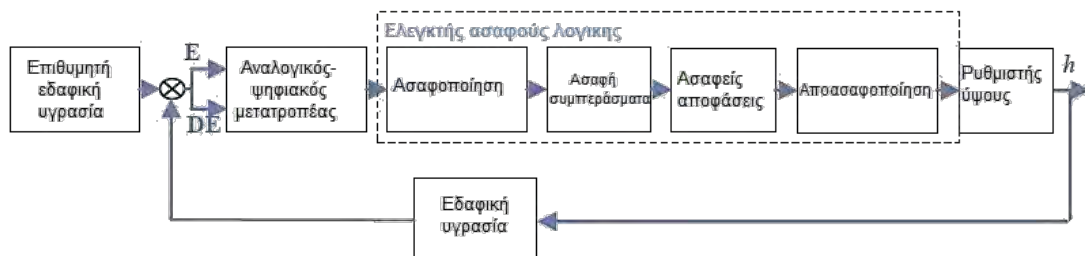
Το αποτέλεσμα και των δύο τύπων του ελεγκτή ερευνήθηκε. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Τα αποτελέσματα έδειξαν υπεροχή του ασαφούς ελεγκτή σε σχέση με τον συμβατικό ON-OFF ελεγκτή.



Εικόνα 4.4. Προτεινόμενο μοντέλο για ελεγκτή άρδευσης. Τροποποιημένη (Rahangadale and Choudhary, 2011, fig. 1)

Οι Singh et al. (2012) παρουσιάζουν μια λύση για έναν ελεγκτή άρδευσης για καλλιέργεια κηπευτικών φυτών με βάση τη μεθοδολογία της ασαφούς λογικής. Σε αυτό το σύστημα η ποσότητα του νερού που παρέχεται στα φυτά, εξαρτάται από το μέγεθος, τον έλεγχο της υγρασίας του εδάφους, η οποία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η εξάτμιση λόγω της ταχύτητας του ανέμου και τον προϋπολογισμό του νερού. Το σύστημα παρέχει νερό στα φυτά με έναν ελεγχόμενο και βέλτιστο τρόπο. Για την τροφοδοσία ρεύματος στη μονάδα ελέγχου της αντλίας χρησιμοποιείται ένα σύστημα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

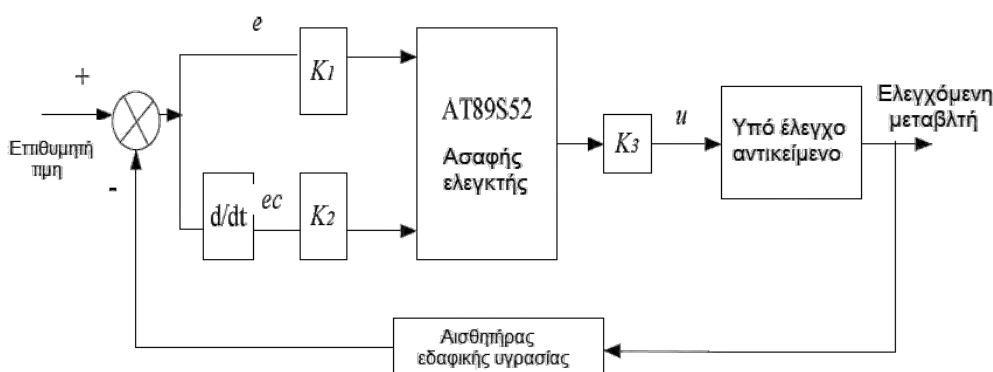
Επίσης, οι Ji et al (2012) παρουσιάζουν ένα σύστημα άρδευσης που ελέγχεται από έναν PD ελεγκτή ασαφούς λογικής και μπορεί αποτελεσματικά να προβλέψει την ποσότητα νερού που απαιτείται από τα φυτά χρησιμοποιώντας το αξιόπιστο μοντέλο άρδευσης, εξισώσεις υπολογισμού της εξάτμισης, κλιματικές συνθήκες, τύπο του εδάφους, τύπο του φυτού και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την άρδευση. Ο ασαφής ελεγκτής άρδευσης φαίνεται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5. Βασικό διάγραμμα ενός PD ελεγκτή ασαφούς λογικής για άρδευση καλλιεργειών. Τροποποιημένη (Ji et al., 2012, fig. 2).

Οι Touati et al. (2013) παρουσίασαν μια πρακτική λύση που βασίζεται σε ένα ευφυές και αποτελεσματικό σύστημα για μια περιοχή με μεγάλη ξηρασία. Το σύστημα αποτελείται από έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής με ανατροφοδότηση που καταγράφει τις βασικές παραμέτρους μέσω ειδικών αισθητήρων και ενός συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης Zigbee-GPRS. Το σύστημα έχει αναπτυχθεί σε υπάρχοντα συστήματα στάγδην άρδευσης, χωρίς οποιαδήποτε φυσική τροποποίηση. Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής δέχεται δεδομένα από τους αισθητήρες και στη συνέχεια εφαρμόζονται ασαφείς κανόνες για την εκτίμηση του κατάλληλου χρόνου και της διάρκειας για άρδευση.

Οι Ge et al. (2013) παρουσίασαν ένα ελεγκτή αυτομάτου ποτίσματος βασισμένο σε ένα μικροελεγκτή AT89S52. Σύμφωνα με την κατάσταση της υγρασίας που μετράται από έναν αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους, το σύστημα μπορεί να ελέγξει την ποσότητα ποτίσματος χρησιμοποιώντας ασαφείς κανόνες ελέγχου ώστε να περιορίζει το χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος της ηλεκτροβάννας του συστήματος άρδευσης. Το σύστημα βασίζεται σε ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων τύπου Mamdani και το σύστημα είναι κλειστού βρόχου, χρησιμοποιώντας ανατροφοδότηση από έναν αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους. Η σχεδίαση του ασαφούς ελεγκτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης ασαφούς λογικής του MATLAB και όλο το σύστημα προσομοιώθηκε στο Simulink. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος ελέγχου έχει καλή ευστάθεια.

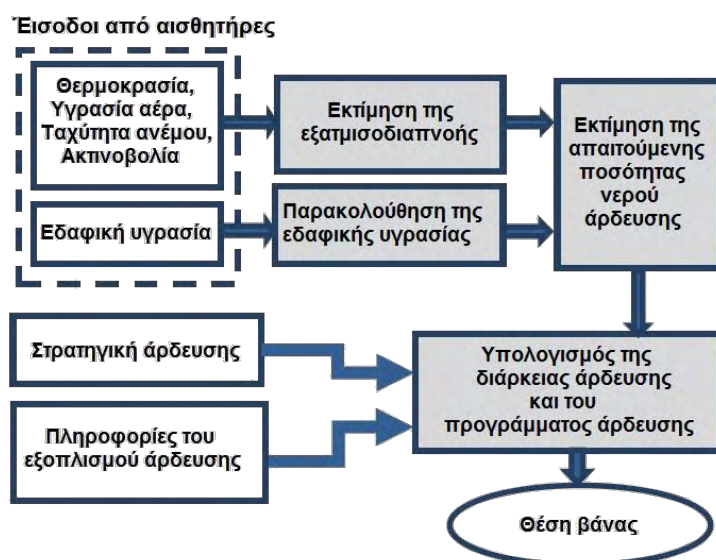


Εικόνα 4.6. Διάγραμμα ελέγχου συστήματος αυτομάτου ποτίσματος. Τροποποιημένη (Ge et al., 2013, fig. 3).

Οι Mousa et al. (2014) προτείνουν ένα σύστημα αποτελεσματικής άρδευσης το οποίο βασίζεται στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και της διαθέσιμης ποσότητας άρδευσης χρησιμοποιώντας μεθοδολογία ασαφούς εξαγωγής συμπερασμάτων. Ο σκοπός του συστήματος αυτού είναι να προγραμματίζει αρδεύσεις σύμφωνα με συγκεκριμένες απαιτήσεις μιας καλλιέργειας και τη μεταβολή διαφόρων κλιματικών κα άλλων παραμέτρων.

Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται ελλειμματικές αρδεύσεις που επηρεάζουν την ποιότητα και την ποσότητα της σοδειάς, χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας δείχνουν ότι το ασαφές μοντέλο είναι ένα γρήγορο και ακριβές εργαλείο τόσο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής όσο και για την απαιτούμενη ποσότητα νερού άρδευσης.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί επίσης σε μικροάρδευση. Το σύστημα αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

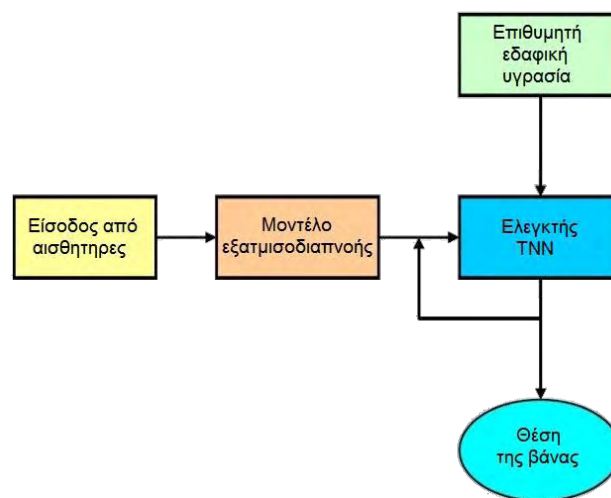


Εικόνα 4.7. Δομή του μοντέλου υποστήριξης αποφάσεων. Τροποποιημένη (Mousa et al., 2014, fig. 1).

4.2.1.2. Ευφυής έλεγχος άρδευσης με νευρωνικά δίκτυα

Οι Umair και Usman (2010) παρουσίασαν ένα ελεγκτή βασισμένο σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ο οποίος αποτελείται από τέσσερα διασυνδεδεμένα στάδια:

- Στο πρώτο στάδιο, συλλέγονται από αισθητήρες διάφορες παράμετροι όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία του αέρα, η υγρασία του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.
- Στο δεύτερο στάδιο, ένα μοντέλο εξατμισοδιαπνοής μετατρέπει τις τέσσερις παραμέτρους της εισόδου σε πραγματική εδαφική υγρασία.
- Στο τρίτο στάδιο, παρέχονται πληροφορίες για τον απαιτούμενο όγκο νερό που απαιτείται για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών.
- Στο τέταρτο στάδιο, συγκρίνεται η απαιτούμενη εδαφική υγρασία με την πραγματική εδαφική υγρασία και παίρνεται δυναμική απόφαση.



Εικόνα 4.8. Μπλοκ διάγραμμα συστήματος άρδευσης με TNN. Τροποποιημένη (Umair and Usman, 2010, fig. 1).

Ο ελεγκτής αποτελείται από δυναμικό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και δεν απαιτεί προϋπάρχουσα γνώση του συστήματος. Οι ελεγκτές αυτού του τύπου έχουν την εγγενή ικανότητα να εναρμονίζονται με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τους Umair και Usman (2010), ελεγκτές άρδευσης βασισμένοι σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εξοικονομήσουν ενεργειακούς και υδατικούς πόρους και να παρέχουν βέλτιστα αποτελέσματα σε όλες τις αρδευόμενες περιοχές.

5. Υλικά και μέθοδοι

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα ευφυούς ελέγχου άρδευσης βασισμένο σε κανόνες ασαφούς λογικής. Για τη μελέτη της λειτουργίας του συστήματος αυτού διεξήχθη ένα εικονικό πείραμα στο γραφικό περιβάλλον του Simulink.

Για τη ολοκληρωμένη μελέτη της λειτουργίας του συστήματος, αρχικά δημιουργήθηκε το μοντέλο του συστήματος και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του μοντέλου αυτού.

Η διαδικασία της δημιουργίας και της προσομοίωσης του μοντέλου του παρόντος ευφυούς συστήματος άρδευσης πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του Simulink το οποίο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του δημοφιλούς λογισμικού MATLAB.

Ο σχεδιασμός του ασαφούς ελεγκτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης ασαφούς λογικής που διαθέτει το MATLAB.

Το σύστημα που παρουσιάζεται μπορεί να εφαρμοστεί για την άρδευση καλλιεργειών οι οποίες έχουν αυξημένες υδατικές ανάγκες και για τις οποίες απαιτείται καθημερινή άρδευση. Με κατάλληλες τροποποιήσεις το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή άρδευσης

5.1. Λογισμικό MATLAB

Το MATLAB έχει ονομαστεί από τις λέξεις MATrix LABoratory και αποτελεί ένα λογισμικό περιβάλλον προγραμματισμού αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης και γραφικής οπτικοποίησης (MathWorks, 2008). Το λογισμικό MATLAB ενδείκνυται για:

- Την εύκολη ανάπτυξη και τον έλεγχο αλγορίθμων, χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο προγραμματιστικό περιβάλλον με έτοιμες συναρτήσεις.
- Πολύπλοκους υπολογισμούς αριθμητικών πράξεων, ανάλυση διαφόρων τύπων δεδομένων και την εύκολη γραφική αναπαράστασή τους.

- Εξειδικευμένες επιστημονικές εφαρμογές σε διάφορες θεματικές περιοχές μέσω κατάλληλων εργαλειαθκών (βελτιστοποίηση, επεξεργασία σήματος, στατιστική, νευρωνικά δίκτυα, ασαφής λογική, θεωρία ελέγχου κ.α.)

5.1.1. Simulink

Το Simulink είναι μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού και αποτελεί επέκταση του λογισμικού MATLAB, καθώς χρησιμοποιείται κυρίως για τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση και την ανάλυση δυναμικών συστημάτων (MathWorks, 2015).

Υποστηρίζει τόσο γραμμικά όσο και μη γραμμικά συστήματα, τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν σε συνεχή ή διακριτό χρόνο (continue or discrete time), ή ακόμη μπορεί να περιλαμβάνει υβριδικά συστήματα, δηλαδή συστήματα τα οποία είναι εν μέρει μοντελοποιημένα σε συνεχή και εν μέρει σε διακριτό χρόνο. Επίσης, στο Simulink υποστηρίζονται συστήματα τα οποία απαιτούν τμηματικά διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας (Αρναουτάκης, 2002).

Για τη μοντελοποίηση συστημάτων, το Simulink παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (Graphical User Interface, GUI) το οποίο επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων ως δομικών διαγραμμάτων, χρησιμοποιώντας λειτουργίες click-and-drag του ποντικιού.

Έτσι, αντίθετα με το MATLAB, στο Simulink ο χρήστης δε χρειάζεται να εισάγει κώδικα, καθώς μπορεί να κατασκευάζει ένα είδος διαγράμματος βαθμίδων σε γραφικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας έτοιμες δομές και εργαλεία.

Η δημιουργία του κατάλληλου κώδικα ώστε να μπορέσει να εκτελεστεί η προσομοίωση γίνεται από το MATLAB. Το Simulink δεν αποτελεί αυτόνομο λογισμικό, παρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον μέσω του MATLAB και σε συνεργασία με αυτό (Αρναουτάκης, 2002).

Στο Simulink περιλαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός από βιβλιοθηκες δομικών στοιχείων (blocks), όπως είναι οι πηγές (sources), τα στοιχεία «απορρόφησης» (sinks), τα συνεχή γραμμικά στοιχεία, τα μη γραμμικά στοιχεία και τα στοιχεία σημάτων και συστημάτων. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιεί τα στοιχεία αυτά αλλά και να δημιουργεί νέα.

Η δομή των μοντέλων που δημιουργούνται στο Simulink είναι ιεραρχική, δηλαδή ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει μπλοκ τα οποία περιέχουν με τη σειρά τους άλλα μπλοκ κοκ. Τα μπλοκ αυτού του είδους ονομάζονται υποσυστήματα (subsystems).

Συστήματα τα οποία αποτελούνται από ιεραρχική δομή, παρουσιάζονται αρχικά σε υψηλό επίπεδο ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων υποσυστημάτων, κάθε ένα από τα οποία μοντελοποιείται ως ένα μπλοκ. Για να εισέλθει ο χρήστης σε χαμηλότερα επίπεδα χρειάζεται να κάνει κλικ με το ποντίκι στα μπλοκ.

Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή του μοντέλου, μπορεί να γίνει η προσομοίωση του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κάποια από τις διάφορες μεθόδους διαθέτει το Simulink (Αρναουτάκης, 2002).

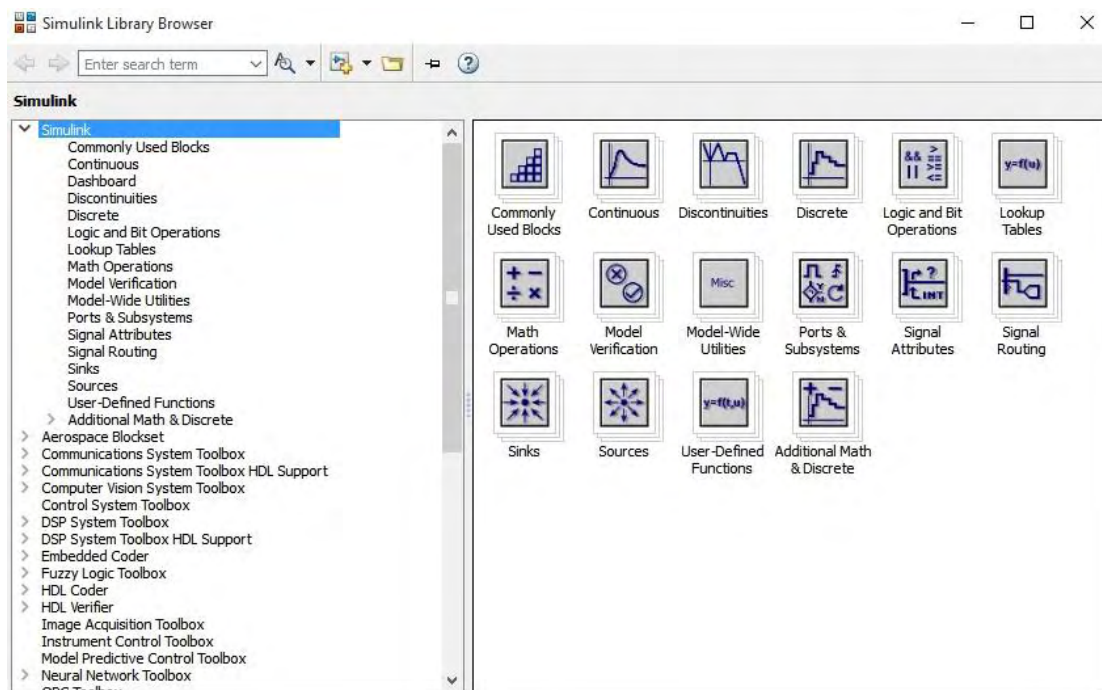
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι δυνατό να παρακολουθηθούν σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση παλμογράφων (scopes) και άλλων μπλοκ απεικόνισης.

Επιπλέον, εφόσον το απαιτεί η εφαρμογή, μπορεί να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο χώρο εργασίας (workspace) του MATLAB για περαιτέρω επεξεργασία. Ακόμη, το Simulink μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όχι μόνο για την προσομοίωση, αλλά και τον έλεγχο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω της εργαλειοθήκης πραγματικού χρόνου (RealTimeWorkshop).

Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης δύναται να αλλάξει τις παραμέτρους του συστήματος ώστε και να μελετήσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που τον ενδιαφέρουν (Αρναουτάκης, 2002).

Σε γενικές γραμμές το Simulink είναι ένα τόσο ισχυρό εργαλείο, είναι ικανό να μετατρέψει τον ηλεκτρονικό υπολογιστή σε ένα εικονικό εργαστήριο με τη δυνατότητα διαμόρφωσης και ανάλυσης συστημάτων. Το βασικότερο πλεονέκτημα του Simulink είναι το φιλικό στο χρήστη γραφικό περιβάλλον που διαθέτει. Συνεπώς, είναι απολύτως φυσικό να χρησιμοποιείται από πολλούς επιστήμονες, ερευνητές, φοιτητές κ.α. και από όσους επιχειρούν να προσομοιώσουν και να επιλύσουν πραγματικά προβλήματα.

Για να εισαχθεί ο χρήστης στο περιβάλλον του Simulink, πρέπει να γράψει στο παράθυρο εντολών του MATLAB `>> simulink` και εμφανίζεται το παράθυρο “Simulink Library Browser” που φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1. Simulink Library Browser. Γενική Άποψη.

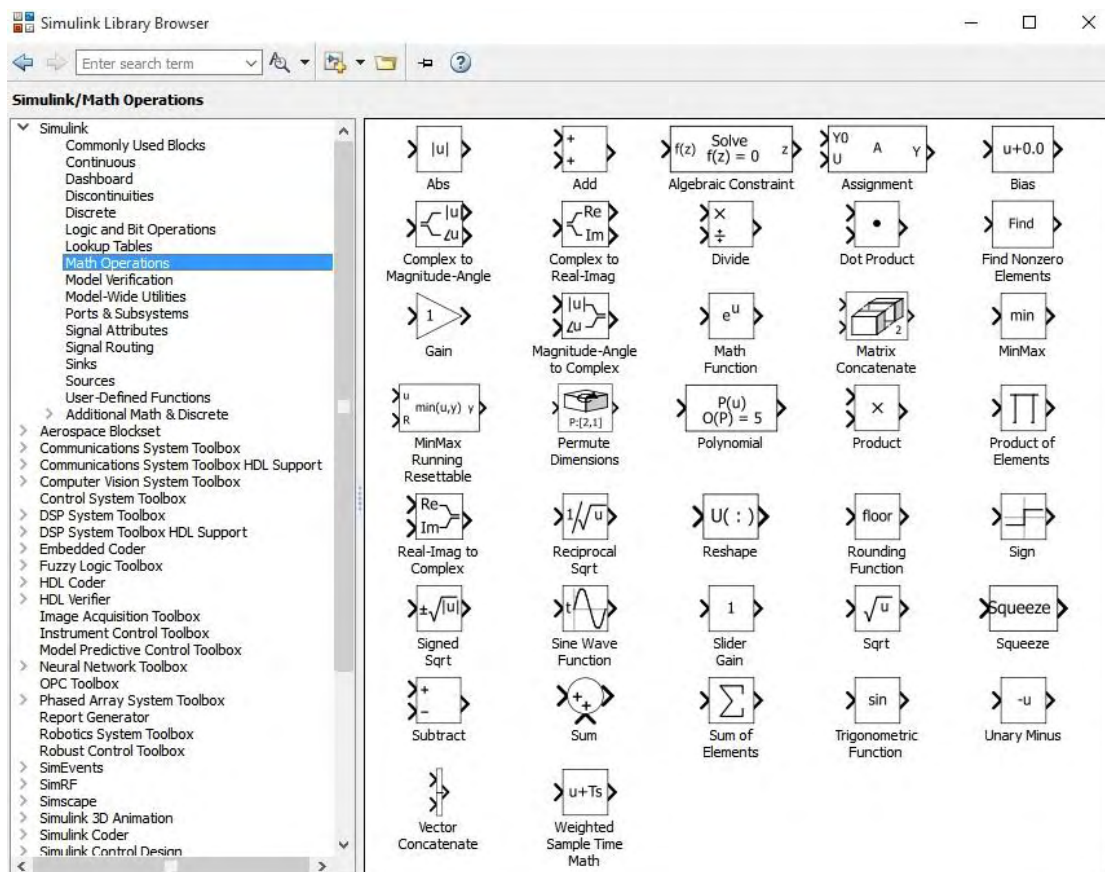
Ο χρήστης μπορεί είτε να ανοίξει ένα υπάρχον αρχείο simulink με επέκταση .mdl ή .slx, είτε να ζητήσει να δημιουργηθεί ένα καινούριο κενό αρχείο.

Ένα μοντέλο στο Simulink αποτελείται από “blocks” και γραμμές οι οποίες ενώνουν με κατάλληλο τρόπο τα διάφορα “blocks” μεταξύ τους. Στην Εικόνα 5.1 εμφανίζονται οι διάφορες κατηγορίες “blocks” που μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιος. Μπορεί να επιλέξει ανάμεσα από τις εξής κατηγορίες:

- Commonly Used Blocks
- Continuous
- Discontinuities
- Discrete
- Logic and Bit Operations
- Lookup Tables
- Math Operations
- Model Verification

- Model-Wide Utilities
- Ports & Subsystems
- Signal Attributes
- Signal Routing
- Sinks
- Sources
- User Defined Functions
- Additional Math & Discrete

Στην κατηγορία “Math Operations” περιέχονται τα “blocks” που φαίνονται στην Εικόνα 5.2. Αυτά αφορούν κυρίως διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις όπως είναι οι συναρτήσεις: Abs, Add, Divide, Dot Product, Product, Rounding Function, Sign, Sine Wave Function, Subtract, Trigonometric Function κλπ.



Εικόνα 5.2. Κατηγορία “Math Operations” του Simulink Library Browser.

5.1.2. Εργαλειοθήκη Ασαφούς Λογικής

Η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής (fuzzy logic toolbox) που παρέχει το λογισμικό MATLAB, αποτελείται από διάφορες λειτουργίες, εφαρμογές, καθώς και ένα μπλοκ στο λογισμικό Simulink για την ανάλυση, το σχεδιασμό και την προσομοίωση συστημάτων που βασίζονται στην ασαφή λογική.

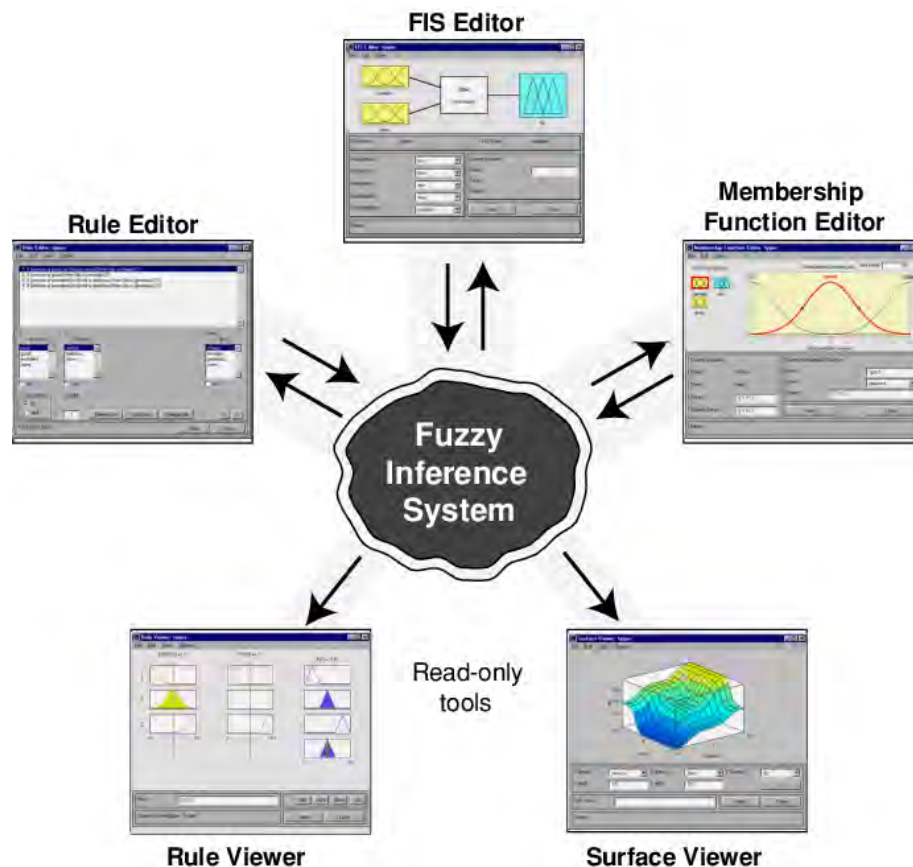
Το περιβάλλον της εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής είναι φιλικό προς το χρήστη. Η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων παρέχοντας λειτουργίες για διάφορες μεθόδους.

Πολύπλοκα συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν με την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής, με τη χρήση απλών κανόνων ασαφούς λογικής και την εφαρμογή των κανόνων αυτών σε ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων (Βολογιαννίδης, 2006).

Η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά (MathWorks, 2016):

- Εφαρμογή σχεδίασης ασαφούς λογικής για τη δημιουργία ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων καθώς και την προβολή και ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Συναρτήσεις συμμετοχής για τη δημιουργία ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων.
- Υποστήριξη για τις λογικές πράξεις AND, OR και NOT στους κανόνες που καθορίζονται από το χρήστη.
- Πρότυπα συστήματα ασαφούς εξαγωγής τύπου Mamdani και Sugeno.
- Αυτοματοποιημένη διαμόρφωση της συνάρτησης συμμετοχής μέσω νευροπροσαρμοστικών τεχνικών μάθησης και τεχνικών μάθησης ασαφούς ομαδοποίησης.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπεράσματος σε ένα μοντέλο Simulink.
- Δυνατότητα δημιουργίας ενσωματώσιμου κώδικα C ή αυτόνομα εκτελέσιμα ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων.

Στην Εικόνα 5.3 φαίνονται τα διάφορα γραφικά περιβάλλοντα που αποτελούν την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB για τη δημιουργία, την τροποποίηση και την απεικόνιση ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων.



Εικόνα 5.3. Η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB αποτελείται από εργαλεία σε γραφικό περιβάλλον (MathWorks, 2016).

5.2. Μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος στο MATLAB/Simulink

5.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος ευφυούς ελέγχου άρδευσης στο Simulink

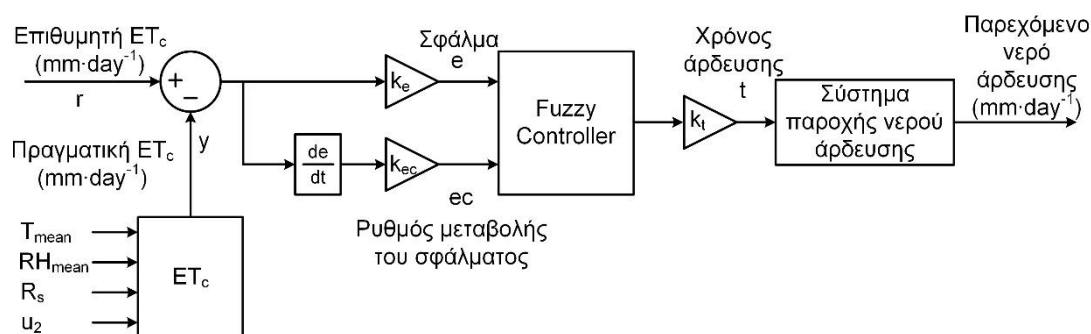
Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση ενός συστήματος ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική για τον αυτοματισμό ενός συστήματος άρδευσης. Πρόκειται για ένα πρωτότυπο μοντέλο συστήματος ευφυούς ελέγχου άρδευσης, το οποίο παρόλο που ενσωματώνει στοιχεία από

διάφορα άλλα συστήματα που έχουν παρουσιαστεί κατά καιρούς σε διάφορες εργασίες, εμπεριέχει μοναδικά στοιχεία και τεχνικές που το διαχωρίζουν από αυτά.

Το σύστημα το οποίο παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου ανοιχτού βρόχου με πρόσθια τροφοδότηση (feedforward control). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα συστήματα αυτά, οι ελεγκτές χρησιμοποιούν γνωστές ή εκτιμώμενες τιμές μελλοντικών διαταραχών έτσι ώστε να αντισταθμίζουν τις επιδράσεις των διαταραχών αυτών εκ των προτέρων. Έτσι, στην παρούσα εργασία, η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αποτελεί την εκτιμώμενη μεταβλητή. Η καρδιά του παρόντος συστήματος ευφυούς ελέγχου αποτελείται από έναν αναλογικό-διαφορικό ασαφή ελεγκτή (PD fuzzy controller). Λόγω της δυναμικής διεργασίας, είναι απαραίτητη η διέλευση κάποιου χρόνου πριν γίνει αντιληπτή η μεταβολή στο σήμα ελέγχου από τη διεργασία εξόδου και ο αναλογικός-διαφορικός ασαφής ελεγκτής αποτελεί την κατάλληλη επιλογή για τον έλεγχο μιας τέτοιας διεργασίας.

Η αναλογική (Proportional, P) δράση του ελεγκτή καθυστερεί τη διόρθωση του σφάλματος e κατά τον αντίστοιχο χρόνο ενώ η διαφορική (Derivative, D) δράση του ελεγκτή συμβάλλει στην πρόβλεψη του μελλοντικού σφάλματος. Έτσι, ο αναλογικός-διαφορικός ασαφής ελεγκτής χρησιμοποιεί τη διαφορική δράση για τον περιορισμό των ταλαντώσεων (Jantzen, 2013).

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής δέχεται δυο εισόδους, το σφάλμα e (error, e) και τη μεταβολή του σφάλματος ec (change-in-error). Έξοδος του ασαφούς ελεγκτή είναι η χρονική διάρκεια άρδευσης t (irrigation time).



Εικόνα 5.4. Διάγραμμα ελέγχου του ευφυούς συστήματος ελέγχου με ασαφή λογική που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.

Αρχικά, για τη λειτουργία του συστήματος ορίστηκε μια τιμή επιθυμητής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας.

Η επιθυμητή τιμή αντιπροσωπεύει την τιμή εκείνη στην οποία πρέπει να φτάσει το σύστημα. Έτσι, επιθυμητή τιμή εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας επιλέχθηκε η τιμή 0.

Οποιαδήποτε πραγματική (εκτιμώμενη-μετρούμενη) τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας προκύπτει είναι $\neq 0$, δεδομένου ότι κάποια ποσότητα νερού χάνεται καθημερινά λόγω της φυσικής αυτής διεργασίας.

Συνήθως, στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου η τιμή αναφοράς ή επιθυμητή τιμή ονομάζεται set point (SP).

Η τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας που προκύπτει από το μοντέλο υπολογισμού το οποίο περιγράφηκε προηγουμένως είναι η μετρούμενη ή πραγματική τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c .

Σε κάθε βήμα χρόνου, το οποίο αντιστοιχεί σε κάθε ημέρα, κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης υπολογίζεται η ημερήσια τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c .

Στη συνέχεια, η επιθυμητή τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας καθώς και η υπολογιζόμενη-πραγματική τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, οδηγούνται σε έναν αθροιστή ώστε να υπολογιστεί το σφάλμα.

Σφάλμα (error, e) ονομάζεται η διαφορά ανάμεσα στην επιθυμητή και την πραγματική τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας και αποτελεί τη μία από τις δυο εισόδους του PD ασαφούς ελεγκτή.

Η επιθυμητή εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας έχει θετικό πρόσημο ενώ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας έχει αρνητικό πρόσημο.

Εφόσον η επιθυμητή τιμή της εξατμισοδιαπνοής είναι μηδενική και η πραγματική έχει πάντα θετικές τιμές ($ET_c \geq 0$), ο αθροιστής θα υπολογίζει πάντα αρνητικές ή μηδενικές τιμές σφάλματος e .

Η επιθυμητή τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αντιστοιχεί στη μεταβλητή $r(t)$ ενώ η πραγματική τιμή της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αντιστοιχεί στη μεταβλητή $y(t)$. Το σφάλμα υπολογίζεται από τη σχέση (3.32).

Ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος εκ αποτελεί τη δεύτερη είσοδο του PD ασαφούς ελεγκτή και υπολογίζεται από τη σχέση (3.33).

Συνεπώς, αναλόγως με τους λεκτικούς κανόνες που έχουν καθοριστεί στο ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων, ο ασαφής ελεγκτής θα ρυθμίζει τη χρονική διάρκεια της άρδευσης σύμφωνα με τη μεταβολή του σφάλματος και του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος έχοντας ως βασικό στόχο την κάλυψη των υδατικών αναγκών.

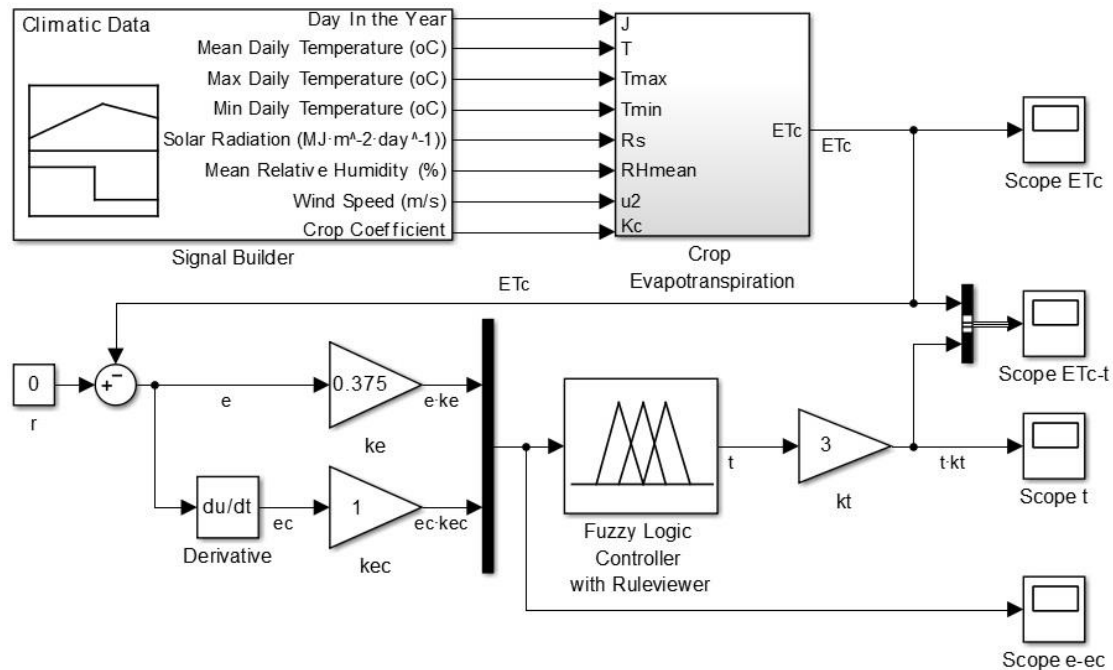
Πρακτικά, η ποσότητα του νερού που προσφέρεται θα πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα του νερού που χάνεται λόγω της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας.

Για την υλοποίηση του ασαφούς ελεγκτή, χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο μπλοκ του Simulink (Fuzzy Controller), το οποίο διασυνδέθηκε με ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων (Fuzzy Inference System, FIS) το οποίο κατασκευάστηκε στο MATLAB.

Παρακάτω γίνεται εκτενής παρουσίαση του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.

Ένας από τους βασικούς λόγους επιλογής του Simulink για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση του παρόντος συστήματος αποτελεί το γραφικό του περιβάλλον, μέσω του οποίου μπορεί εύκολα κάποιος να ελέγξει, να προσθέσει ή να αφαιρέσει στοιχεία και γενικά να έχει εύκολη πρόσβαση στις εξισώσεις και τα στοιχεία του μοντέλου που αποτελεί το σύστημα.

Στην Εικόνα 5.5 φαίνεται η κεντρική οθόνη του Simulink όπου απεικονίζεται συνολικά το μοντέλο του συστήματος.



Εικόνα 5.5. Μοντέλο του συστήματος ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική για τον αυτοματισμό ενός συστήματος άρδευσης.

Τελεστές k_e , k_{ec} και k_t μοντελοποιούνται με το μπλοκ Gain. Η παράγωγος του σφάλματος μοντελοποιείται με το μπλοκ Derivative. Ο ασαφής ελεγκτής μοντελοποιείται με το μπλοκ Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer.

Κάνοντας διπλό κλικ στο μπλοκ του ασαφούς ελεγκτή, ανοίγει ένα παράθυρο που ζητά να δώσουμε το όνομα ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS), το οποίο έχει δημιουργηθεί προηγουμένως με την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα scopes για την αποτύπωση των γραφικών παραστάσεων της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας και του χρόνου άρδευσης μαζί, του χρόνου άρδευσης, του σφάλματος και της μεταβολής του σφάλματος μαζί.

5.2.1.1. Δεδομένα εισόδου

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα σε ένα αρχείο excel. Χρησιμοποιώντας το μπλοκ Signal Builder του Simulink, τα δεδομένα εισήχθησαν και δημιούργησαν επτά ανεξάρτητα σήματα συνεχούς χρόνου (continuous signals).

Ως είσοδοι για την παρούσα προσομοίωση έχουν χρησιμοποιηθεί πραγματικά ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα προερχόμενα από τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται τοποθετημένος στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Το αγρόκτημα βρίσκεται κοντά στην Εθνική Οδό Αθηνών Θεσσαλονίκης, στην περιοχή Βελεστίνου, Μαγνησίας (39°2' Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος, 22°45' Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος) και σε υψόμετρο 70m από την επιφάνεια της θάλασσας. Καλύπτει έκταση 150 στρεμμάτων και χρησιμοποιείται για τις ερευνητικές και εκπαιδευτικές ανάγκες μελών και φοιτητών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.

Τα δεδομένα που παρέχονται (πίνακας 5.1) μεταβάλλονται ανά ημέρα και αναφέρονται σε 133 ημέρες, δηλαδή σε μια ολόκληρη καλλιεργητική περίοδο, από Μάιο έως Σεπτέμβριο του 2014. Το βήμα χρόνου που έχει οριστεί στο Simulink είναι ανά 1 second το οποίο αντιστοιχεί σε 1 ημέρα.

Πίνακας 5.1. Πίνακας των δεδομένων εισόδου από τον μετεωρολογικό σταθμό.

Day No	J Day In the Year	T _{mean} Mean Daily Temperature (°C)	T _{max} Max Daily Temperature (°C)	T _{min} Min Daily Temperature (°C)	R _s Solar Radiation (MJ·m ⁻² ·day ⁻¹)	RH _{mean} Mean Relative Humidity (%)	u ₂ Wind Speed (m/s)	K _c
1	121	14.30	19.80	10.30	13.78	78.70	1.03	0.5
2	122	16.30	22.30	10.40	18.68	76.48	1.08	0.5
3	123	15.00	21.10	11.70	14.96	78.47	1.25	0.5
4	124	14.00	17.50	10.80	9.00	80.00	0.97	0.5
5	125	17.30	23.70	12.60	16.89	70.13	1.25	0.5
6	126	16.50	23.40	12.90	14.06	77.39	1.03	0.5
7	127	18.00	25.60	11.30	20.90	69.56	0.89	0.5
8	128	20.20	27.40	13.70	23.99	58.17	1.17	0.5
9	129	21.40	30.60	13.20	23.14	60.70	1.08	0.5
10	130	21.30	29.70	13.40	22.51	57.45	0.94	0.5
11	131	21.90	30.40	14.90	22.35	55.22	0.94	0.5
12	132	22.80	31.30	15.70	23.23	53.45	1.03	0.5
13	133	24.60	32.90	17.10	23.34	53.11	1.39	0.5
14	134	24.20	31.70	16.30	23.05	62.20	1.11	0.5
15	135	23.90	31.20	16.10	21.87	65.37	0.81	0.5
16	136	23.20	30.70	16.50	18.73	68.26	0.94	0.5
17	137	22.10	26.30	17.80	11.38	67.58	0.67	0.5
18	138	21.70	28.80	15.30	18.54	65.29	1.03	0.5
19	139	24.00	30.60	18.10	23.11	57.32	1.19	0.5
20	140	23.30	29.90	15.50	23.20	58.86	0.81	0.5
21	141	22.80	29.90	14.40	24.78	57.47	1.08	0.5

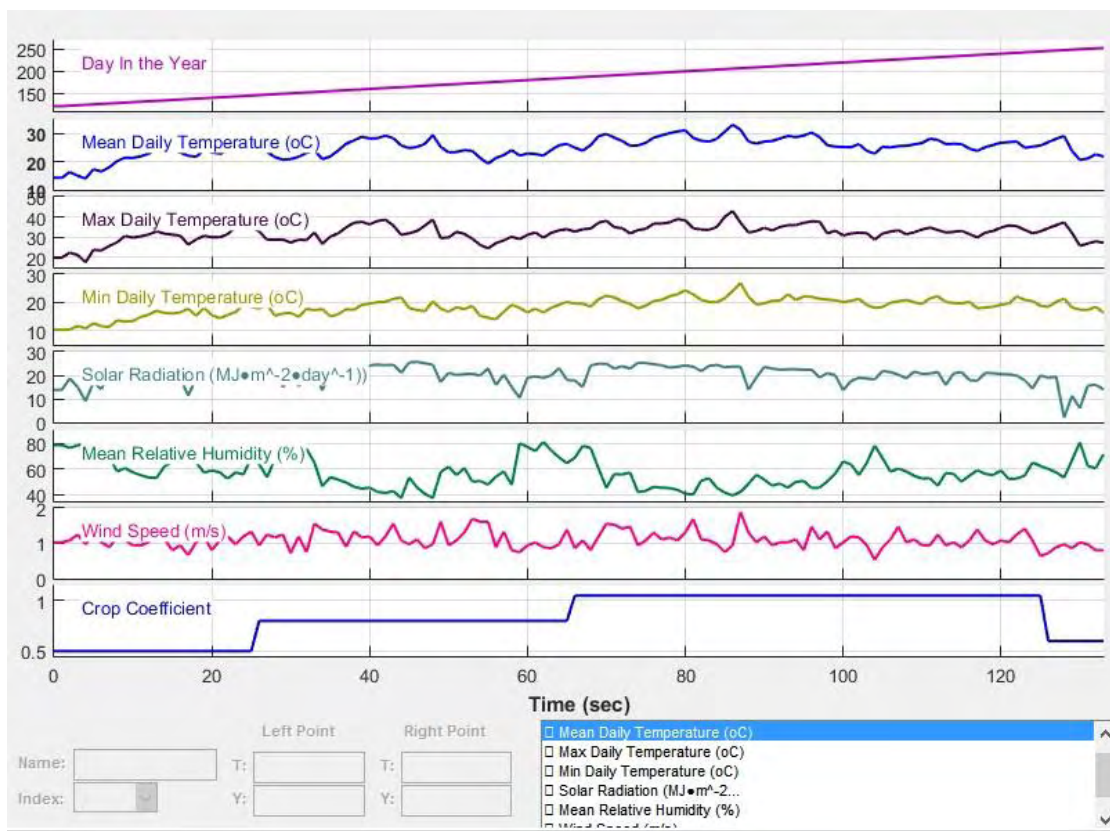
22	142	23.80	31.50	15.60	24.18	52.53	1.19	0.5
23	143	24.80	34.80	16.60	22.16	57.41	0.97	0.5
24	144	27.00	35.70	19.20	24.37	55.80	1.19	0.5
25	145	24.70	34.80	18.30	21.18	68.72	1.33	0.5
26	146	25.00	32.80	17.90	18.12	63.85	0.94	0.8
27	147	23.40	28.70	19.10	21.45	53.65	1.25	0.8
28	148	21.60	28.70	15.30	22.71	67.83	1.17	0.8
29	149	20.70	28.80	16.10	14.85	73.68	1.25	0.8
30	150	20.90	27.30	16.30	20.65	80.74	0.72	0.8
31	151	21.70	28.70	14.90	15.27	79.98	1.19	0.8
32	152	23.10	28.50	17.80	18.51	75.80	0.75	0.8
33	153	24.00	32.30	17.20	21.87	65.03	1.56	0.8
34	154	20.90	26.60	17.70	13.59	46.60	1.39	0.8
35	155	21.80	30.20	15.10	21.79	53.71	1.33	0.8
36	156	23.90	31.80	15.80	21.56	51.73	1.31	0.8
37	157	26.30	34.80	17.60	24.67	49.61	1.03	0.8
38	158	27.50	37.10	17.40	24.81	46.23	1.33	0.8
39	159	28.80	37.60	19.10	22.02	44.73	1.17	0.8
40	160	28.20	36.30	19.60	24.24	45.51	1.19	0.8
41	161	28.30	38.00	20.10	24.49	42.16	0.94	0.8
42	162	29.20	38.60	20.20	24.28	41.50	1.19	0.8
43	163	28.30	35.70	21.30	24.53	42.83	1.56	0.8
44	164	25.70	31.10	21.80	21.07	37.42	1.08	0.8
45	165	24.80	31.90	18.00	25.46	53.47	0.97	0.8
46	166	25.20	33.00	17.30	25.71	45.71	1.11	0.8
47	167	26.30	35.70	16.90	25.05	40.68	0.86	0.8
48	168	29.40	38.70	20.40	24.53	37.43	0.97	0.8
49	169	25.20	29.50	17.80	17.11	57.75	1.61	0.8
50	170	23.30	29.80	16.70	21.06	61.91	0.94	0.8
51	171	23.40	32.60	18.30	20.14	55.28	1.08	0.8
52	172	24.10	31.60	17.60	20.49	60.85	1.31	0.8
53	173	23.80	29.20	18.80	20.63	50.28	1.69	0.8
54	174	21.30	26.10	15.30	19.86	50.73	1.61	0.8
55	175	19.30	24.40	14.60	22.93	47.87	1.61	0.8
56	176	21.30	27.00	14.00	15.85	54.10	0.89	0.8
57	177	22.30	28.40	16.70	20.26	58.18	1.33	0.8
58	178	24.10	30.20	19.20	15.00	47.61	0.81	0.8
59	179	22.10	29.00	18.10	10.41	80.13	0.75	0.8
60	180	22.90	31.10	16.50	18.92	77.27	0.94	0.8
61	181	22.70	32.30	17.80	19.52	74.07	1.03	0.8
62	182	22.10	29.70	16.40	18.93	81.17	0.89	0.8
63	183	24.10	32.10	18.10	19.92	74.50	0.86	0.8
64	184	25.80	33.40	19.20	23.07	69.10	0.97	0.8
65	185	26.30	33.90	20.20	17.98	64.54	1.39	0.8
66	186	24.90	32.70	19.60	17.80	68.83	0.86	1.05
67	187	23.90	33.90	19.60	14.97	78.13	1.08	1.05
68	188	25.80	34.20	18.50	24.16	76.34	0.81	1.05
69	189	29.00	37.10	21.20	24.90	60.48	1.19	1.05
70	190	29.80	38.10	22.40	24.87	45.37	1.56	1.05
71	191	28.50	34.90	21.80	22.86	56.12	1.53	1.05
72	192	27.30	34.40	20.40	23.85	55.83	1.42	1.05
73	193	25.60	31.80	19.50	22.80	57.23	1.47	1.05

74	194	25.70	33.50	17.90	25.30	42.03	0.94	1.05
75	195	26.70	34.10	18.80	25.21	43.05	1.08	1.05
76	196	28.50	36.70	20.60	24.66	46.18	1.31	1.05
77	197	29.30	36.70	20.90	24.24	45.44	1.11	1.05
78	198	30.10	37.30	22.20	23.22	45.23	1.17	1.05
79	199	30.70	38.90	22.90	23.59	43.81	1.08	1.05
80	200	31.10	38.30	24.30	24.17	40.88	1.31	1.05
81	201	28.40	34.40	22.90	23.63	40.07	1.69	1.05
82	202	27.40	33.70	20.90	21.75	50.87	1.11	1.05
83	203	27.10	33.60	20.20	24.00	52.93	1.08	1.05
84	204	28.10	35.10	20.10	24.44	45.41	0.97	1.05
85	205	30.60	40.00	21.50	23.38	41.70	0.75	1.05
86	206	33.10	42.90	24.10	23.69	39.43	0.94	1.05
87	207	31.30	37.10	26.90	23.65	42.23	1.89	1.05
88	208	27.10	32.30	22.00	13.81	48.48	1.31	1.05
89	209	26.40	33.00	19.30	19.06	55.57	1.03	1.05
90	210	27.10	34.60	19.70	23.52	51.81	1.19	1.05
91	211	27.30	33.30	20.60	22.81	47.20	0.94	1.05
92	212	28.20	35.00	20.60	22.38	48.69	1.03	1.05
93	213	29.10	35.90	22.90	22.54	45.42	1.03	1.05
94	214	28.70	35.90	20.90	22.54	50.02	1.11	1.05
95	215	29.20	37.10	22.10	22.38	50.79	0.81	1.05
96	216	30.30	37.80	22.00	22.39	45.31	1.47	1.05
97	217	28.70	37.70	21.30	19.04	45.47	1.11	1.05
98	218	25.80	31.80	21.00	20.94	50.42	1.33	1.05
99	219	25.30	33.20	20.80	20.03	56.46	0.86	1.05
100	220	25.20	30.80	20.10	13.64	65.98	1.03	1.05
101	221	25.10	31.80	20.60	17.58	63.59	1.19	1.05
102	222	26.20	32.20	21.30	18.94	55.33	1.17	1.05
103	223	23.80	31.90	19.10	18.63	64.93	0.94	1.05
104	224	22.80	28.70	18.10	18.17	78.36	0.53	1.05
105	225	25.30	31.80	18.40	21.81	68.39	0.89	1.05
106	226	25.00	32.70	19.90	21.35	57.93	1.11	1.05
107	227	25.50	33.40	20.40	20.23	60.43	1.47	1.05
108	228	25.60	31.40	20.90	18.72	58.12	1.03	1.05
109	229	26.10	32.40	20.10	21.55	54.72	1.11	1.05
110	230	26.60	33.80	19.40	20.54	52.64	0.94	1.05
111	231	28.10	34.70	21.50	20.74	52.85	0.94	1.05
112	232	27.70	33.50	22.20	21.39	47.02	1.25	1.05
113	233	26.20	32.30	20.20	15.86	56.92	0.94	1.05
114	234	26.30	32.60	19.80	20.79	56.25	1.03	1.05
115	235	26.20	33.10	19.70	21.37	50.09	0.89	1.05
116	236	24.60	31.50	20.20	17.95	54.87	1.08	1.05
117	237	23.80	29.80	17.90	17.65	59.07	1.39	1.05
118	238	25.10	32.20	18.20	21.01	56.27	1.08	1.05
119	239	25.90	33.00	18.50	20.86	55.38	0.97	1.05
120	240	26.70	34.70	19.20	20.48	58.89	1.08	1.05
121	241	26.90	35.80	19.60	20.38	52.25	1.03	1.05
122	242	27.10	35.40	22.20	19.82	52.53	1.25	1.05
123	243	24.90	33.60	20.90	17.89	54.84	1.42	1.05
124	244	25.30	31.90	20.50	14.35	65.08	1.08	1.05
125	245	25.70	32.80	18.80	19.93	62.43	0.64	1.05

126	246	26.90	34.50	18.50	18.94	60.08	0.72	0.6
127	247	28.10	35.90	20.20	19.40	57.46	0.89	0.6
128	248	29.10	37.30	21.40	1.95	53.40	0.97	0.6
129	249	23.80	32.10	18.20	11.23	66.92	0.86	0.6
130	250	20.60	25.70	17.50	5.96	80.83	1.03	0.6
131	251	21.10	26.80	17.30	15.62	62.33	0.97	0.6
132	252	22.60	27.90	18.50	15.99	60.73	0.81	0.6
133	253	21.80	27.20	16.30	13.92	71.51	0.81	0.6

Οι μεταβλητές που οδηγήθηκαν στο μπλοκ signal builder του Simulink και δημιούργησαν επτά ανεξάρτητα σήματα συνεχούς χρόνου, είναι:

- Day in the Year: Ημέρα του χρόνου (day)
- Mean Daily Temperature: Μέση ημερήσια εξωτερική θερμοκρασία (°C)
- Max Daily Temperature: Μέγιστη ημερήσια εξωτερική θερμοκρασία (°C)
- Min Daily Temperature: Ελάχιστη ημερήσια εξωτερική θερμοκρασία (°C)
- Solar Radiation: Ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$)
- Mean Relative Humidity: Μέση ημερήσια εξωτερική σχετική υγρασία (%)
- Wind Speed: Ταχύτητα ανέμου ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Crop Coefficient: Συντελεστής καλλιέργειας



Εικόνα 5.6. Μοντελοποίηση των δεδομένων εισόδου ως σήματα συνεχούς χρόνου όπως φαίνονται στο μπλοκ Signal Builder.

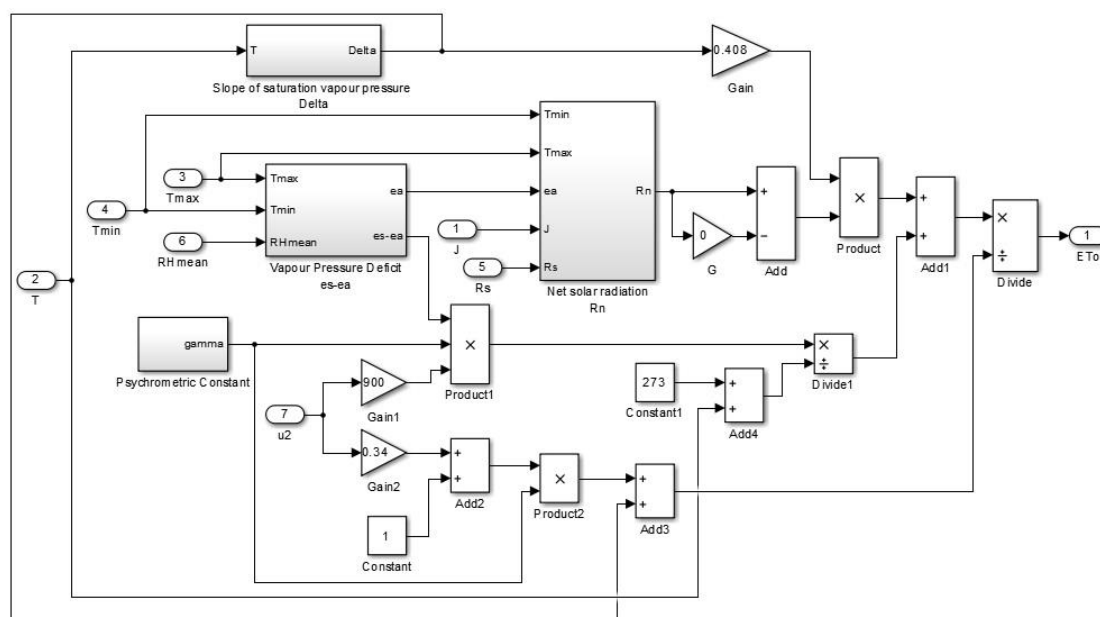
5.2.1.2. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ETo κατά Penman-Monteith

Στη συνέχεια, η έξοδοι του signal builder συνδέθηκαν ως είσοδοι στο μπλοκ το οποίο υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ETo σύμφωνα με την εξίσωση (2.6) των Penman-Monteith, απαιτούνται τέσσερις βασικές μετεωρολογικές παράμετροι ως είσοδοι (Allen et al., 1998):

- Η μέση εξωτερική θερμοκρασία, T_{mean} .
- Η μέση σχετική υγρασία, RH_{mean} .
- Η ηλιακή ακτινοβολία, R_s .
- Η ταχύτητα του ανέμου, u_2 .

Τα μοντέλα όλων των εξισώσεων που υπεισέρχονται στην εξίσωση Penman-Monteith, σχεδιάστηκαν στο γραφικό περιβάλλον του Simulink.



Εικόνα 5.7. Μοντέλο της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά Penman-Monteith

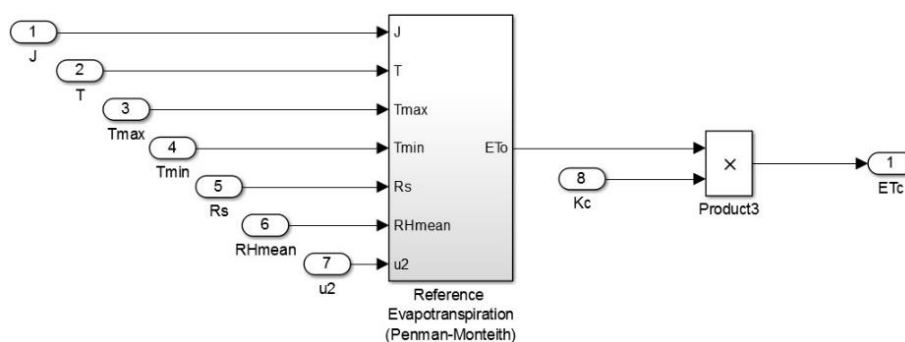
Τα επιμέρους μεγέθη που υπεισέρχονται στην εξίσωση των Penman-Monteith υπολογίζονται υπό τη μορφή υποσυστημάτων (subsystems).

5.2.1.3. Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c

Η έξοδος του μοντέλου της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o οδηγείται σε ένα product block μαζί με το σήμα που αντιπροσωπεύει τον συντελεστή καλλιέργειας K_c, προερχόμενο από την έξοδο του signal builder.

Η έξοδος του product block δίνει την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c, καθώς το γινόμενο που προκύπτει είναι ίσο με την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c (2.4).

Η ημερήσια τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o πολλαπλασιάζεται με την τιμή του συντελεστή καλλιέργειας K_c, ο οποίος αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ημέρα της καλλιεργητικής περιόδου. Ο συντελεστής καλλιέργειας δίνεται για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια.



Εικόνα 5.8. Μοντέλο της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c.

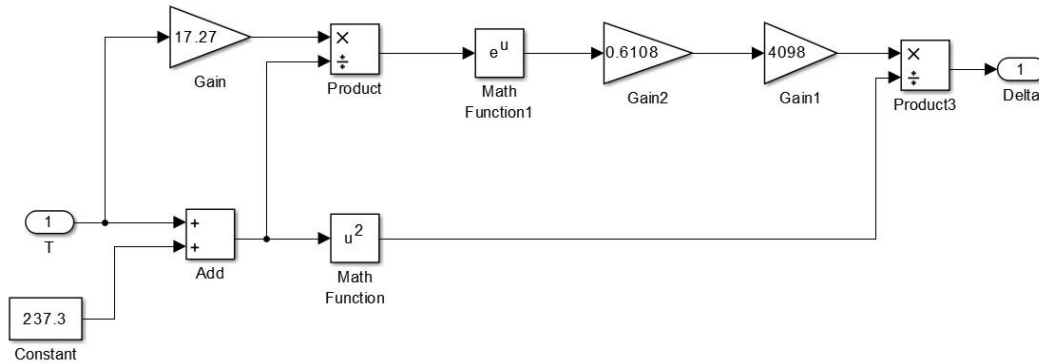
5.2.1.4. Κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T (Slope of saturation vapor pressure)

Η κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών υπολογίζεται από τη σχέση (Allen et al., 1998):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0.6108 \cdot e^{\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3} \right)} \right]}{(T + 237.3)^2}, \text{ σε kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3.40)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία του αέρα (T_{mean}, °C) που μπορεί να υπολογιστεί και ως :

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}, \text{ σε } ^\circ\text{C} \quad (3.41)$$

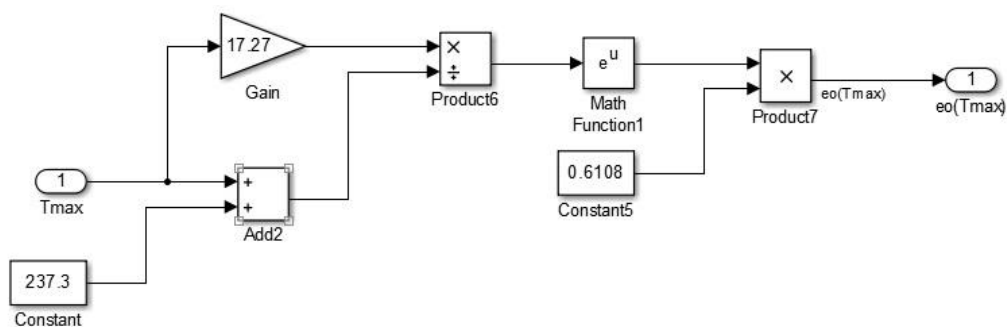


Εικόνα 5.9. Μοντέλο της κλίσης της καμπύλης υδρατμών Δ στη θερμοκρασία T .

5.2.1.5. Πίεση κορεσμού υδρατμών στη μέγιστη θερμοκρασία αέρα T_{max} (Saturation vapor pressure at the maximum air temperature)

Οι παράμετρος $e^o(T_{\text{max}})$ εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα T_{max} και για τον υπολογισμό της μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση (Allen et al., 1998):

$$e^o(T_{\text{max}}) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{\text{max}}}{T_{\text{max}} + 237,3}\right)}, \text{ σε kPa} \quad (3.42)$$

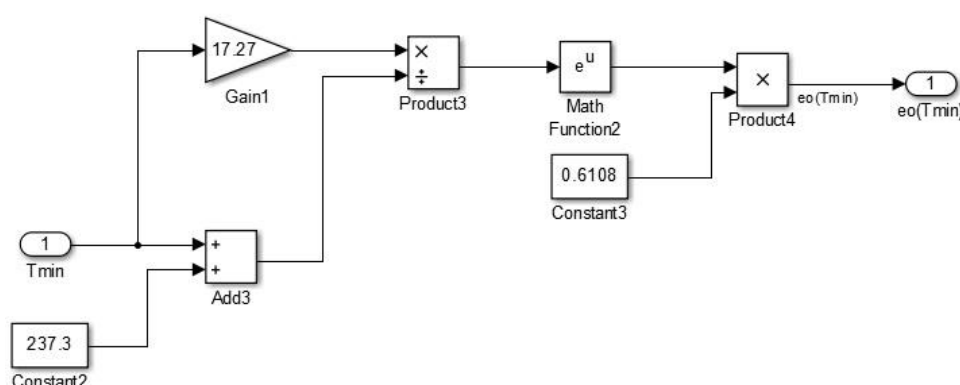


Εικόνα 5.10. Μοντέλο της πίεσης κορεσμού υδρατμών στη μέγιστη θερμοκρασία αέρα.

5.2.1.6. Πίεση κορεσμού υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία αέρα T_{min} (Saturation vapor pressure at the maximum air temperature)

Οι πίεση κορεσμού υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία $e^o(T_{min})$ εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα T_{min} και για τον υπολογισμό της μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση (Allen et al., 1998):

$$e^o(T_{min}) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3}\right)}, \text{ σε kPa (3.43)}$$

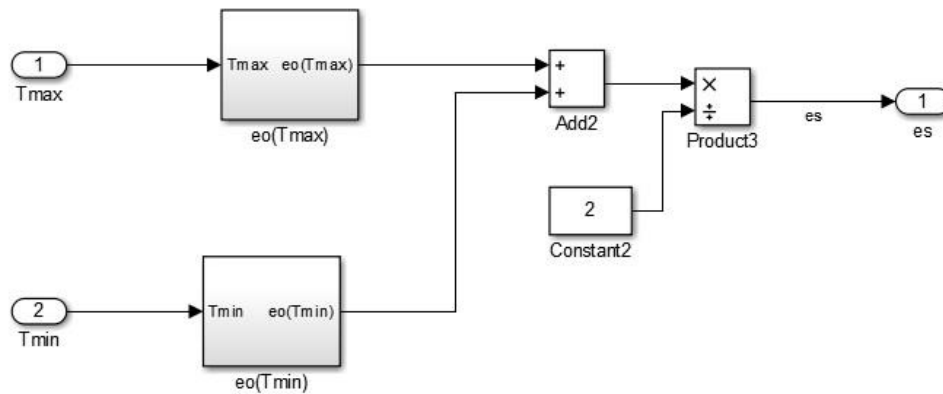


Εικόνα 5.11. Μοντέλο της πίεση κορεσμού υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία αέρα.

5.2.1.7. Μέση πίεση κορεσμού υδρατμών (Mean saturation vapor pressure)

Η μέση πίεση κορεσμού υδρατμών e_s στην παρακάτω εξίσωση υπολογίζεται ως η μέση τιμή που προκύπτει για τις θερμοκρασίες T_{max} και T_{min} και οι οποίες αναφέρονται σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο (ημέρα, εβδομάδα, δεκαήμερο, μήνα) :

$$e_s = \frac{e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})}{2}, \text{ σε kPa (3.44)}$$

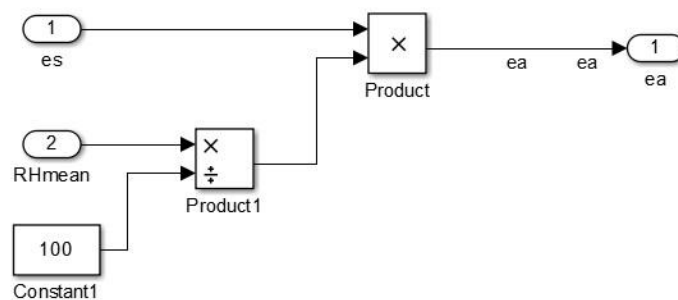


Εικόνα 5.12. Μοντέλο της μέσης πίεσης κορεσμού υδρατμών.

5.2.1.8. Πραγματική πίεση υδρατμών (Actual vapor pressure)

Η πραγματική πίεση υδρατμών e_a , υπολογίζεται από την πίεση κορεσμού υδρατμών e_s και τη σχετική υγρασία του αέρα RH (%) ως :

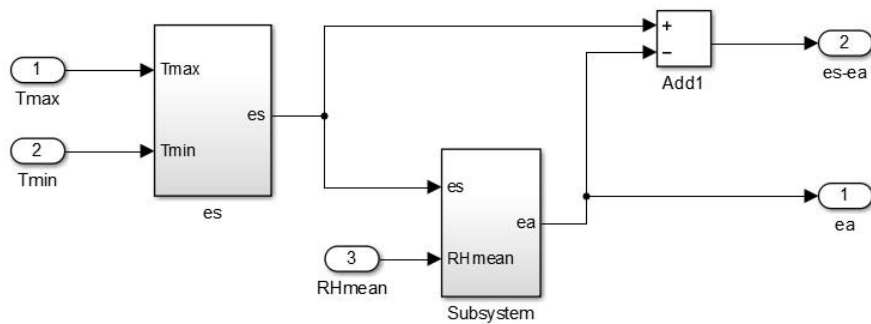
$$e_a = e_s \cdot \frac{RH_{mean}}{100}, \text{ σε kPa (3.45)}$$



Εικόνα 5.13. Μοντέλο της πραγματικής πίεσης υδρατμών.

5.2.1.9. Έλλειμμα πίεσης υδρατμών (Vapor pressure deficit)

Το έλλειμμα πίεσης υδρατμών $e_s - e_a$ υπολογίζεται από το μοντέλο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 5.14. Μοντέλο ελλείματος πίεσης υδρατμών.

5.2.1.10. Ψυχομετρική σταθερά (Psychometric constant)

Η ψυχομετρική σταθερά γ υπολογίζεται ως :

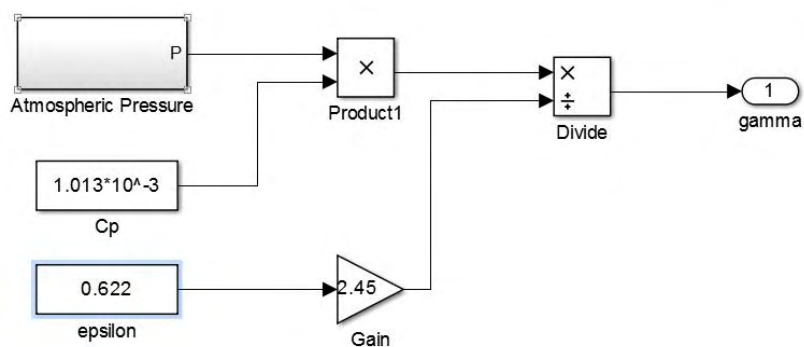
$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P \text{ , σε kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \text{ (3.46)}$$

όπου:

c_p : Η ειδική θερμότητα υγρού αέρα ($c_p=1,013 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

ε : Ο λόγος μοριακού βάρους υδρατμών προς μοριακό βάρος ξηρού αέρα ($\varepsilon=0,622$).

λ : Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($\lambda=2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).



Εικόνα 5.15. Μοντέλο της ψυχομετρικής σταθεράς.

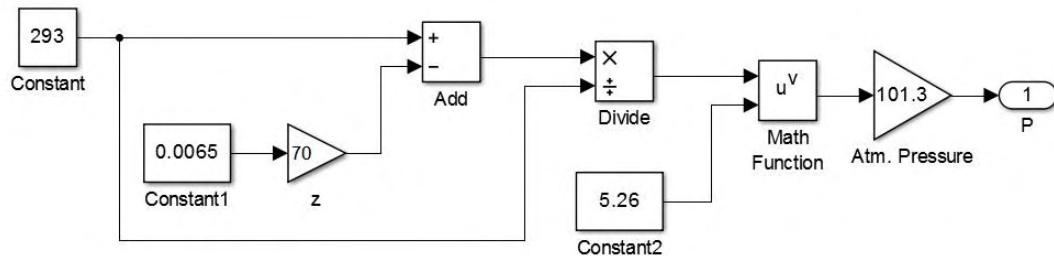
5.2.1.11. Ατμοσφαιρική πίεση (Atmospheric pressure)

Η ατμοσφαιρική πίεση P υπολογίζεται ως:

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26}, \text{ σε kPa (3.47)}$$

όπου:

z: Το υψόμετρο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (m).

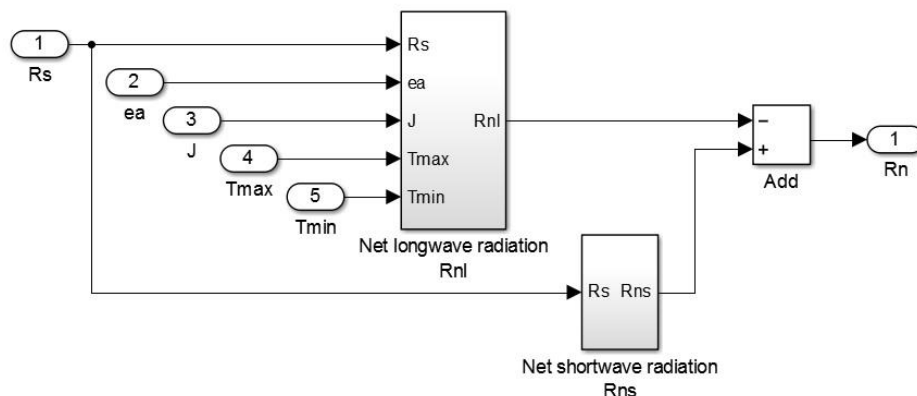


Εικόνα 5.16. Μοντέλο της ατμοσφαιρικής πίεσης.

5.2.1.12. Καθαρή ακτινοβολία (Net radiation)

Η καθαρή ακτινοβολία R_n , ισούται με τη διαφορά της εισερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας μικρού μήκους R_{ns} και της εξερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους R_{nl} :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}, \text{ σε MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \text{ (3.48)}$$



Εικόνα 5.17. Μοντέλο της καθαρής ακτινοβολίας.

5.2.1.13. Καθαρή ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (Net solar radiation)

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος R_{ns} προκύπτει από τη σχέση:

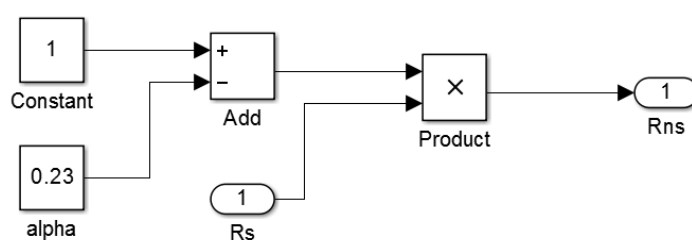
$$R_{ns} = (1 - a) \cdot R_s, \text{ σε MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \text{ (3.49)}$$

όπου:

a : Ο συντελεστής ανακλαστικότητας της καλλιέργειας αναφοράς ή albedo ($a = 0,23$).

R_s : Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$).

Για την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, R_s , στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται πραγματικές τιμές μετρήσεων από τον μετεωρολογικό σταθμό που αναφέρεται πιο πάνω.



Εικόνα 5.18. Καθαρή ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.

5.2.1.14. Καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (Net longwave radiation)

Η καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος R_{nl} αντιπροσωπεύει τη διαφορά της ενέργειας που ακτινοβολεί η γη προς το περιβάλλον και αυτής που δέχεται η γη από το περιβάλλον σαν ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (Allen et al., 1998).

Η καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος R_{nl} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (3.50)$$

όπου:

R_{nl} : Η καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$).

σ : Η σταθερά Stephan - Boltzman ($\text{MJ} \cdot ^\circ\text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$).

$T_{\max,K}$: Η μέγιστη απόλυτη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας (K)

$[T_K = T_C + 273,16]$.

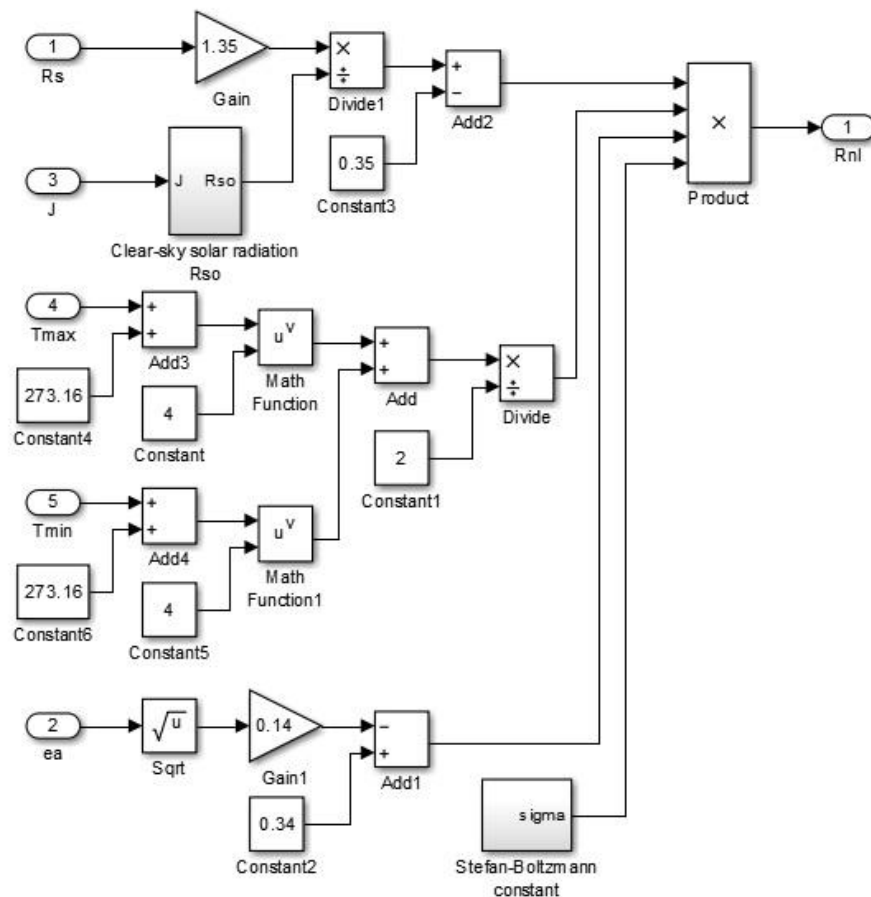
$T_{\min,K}$: Η ελάχιστη απόλυτη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας (K)

$[T_K = T_C + 273,16]$

e_a : Η πραγματική πίεση των υδρατμών στον αέρα (kPa),

R_s : Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)

R_{so} : Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)

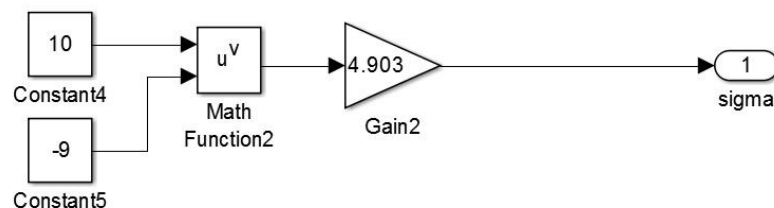


Εικόνα 5.19. Μοντέλο καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος.

5.2.1.15. Σταθερά Stephan - Boltzman (Stephan - Boltzman constant)

Η σταθερά Stephan – Boltzman σ , δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9}, \text{ σε MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \text{ (3.51)}$$

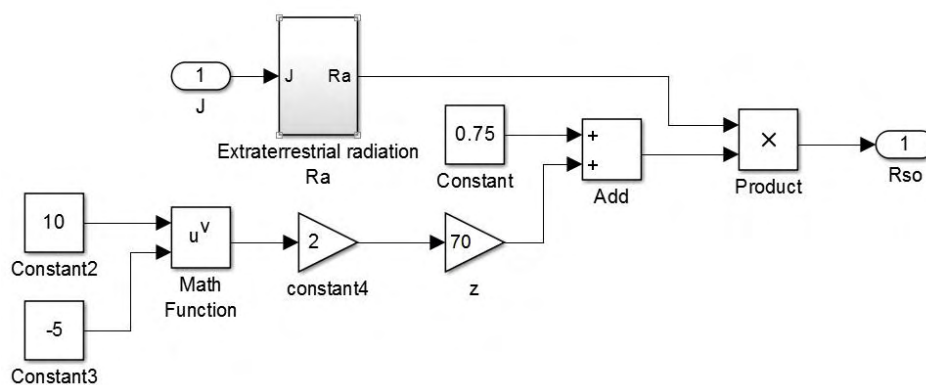


Εικόνα 5.20. Μοντέλο της σταθεράς Stephan – Boltzman.

5.2.1.16. Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού (Clear-sky solar radiation)

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού R_{so} , για οποιοδήποτε υψόμετρο z (m) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \text{ (3.52), σε MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$$



Εικόνα 5.21. Μοντέλο της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας καθαρού ουρανού.

5.2.1.17. Εξωγήινη ακτινοβολία (Extraterrestrial radiation)

Η εξωγήινη ακτινοβολία R_a , μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (3.53)$$

ΌΤΟΥ:

R_a : Η εξωγήινη ακτινοβολία ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$).

G_{sc} : Η ηλιακή σταθερά ($G_{sc}=0.0820 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$).

d_r : Η σχετική απόσταση μεταξύ γης και ήλιου.

ω_s : Η ωριαία γωνία δύσης ηλίου (rad).

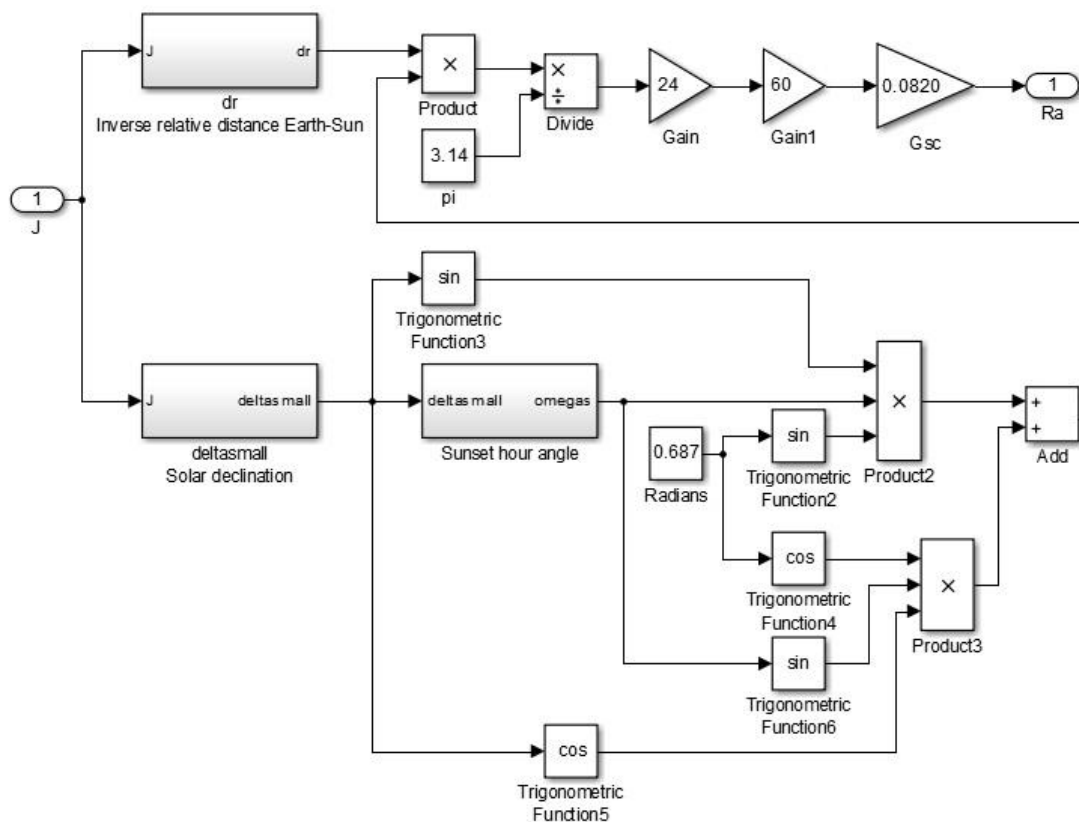
φ : Το γεωγραφικό πλάτος σε (rad).

δ : Η απόκλιση του ήλιου σε (rad).

J: Η Ιουλιανή ημέρα του έτους [J=1, 2,...,365 (366)].

Το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής του Βελεστίνου, όπου βρίσκεται ο μετεωρολογικός σταθμός είναι:

$\varphi=0.687$ (rad)

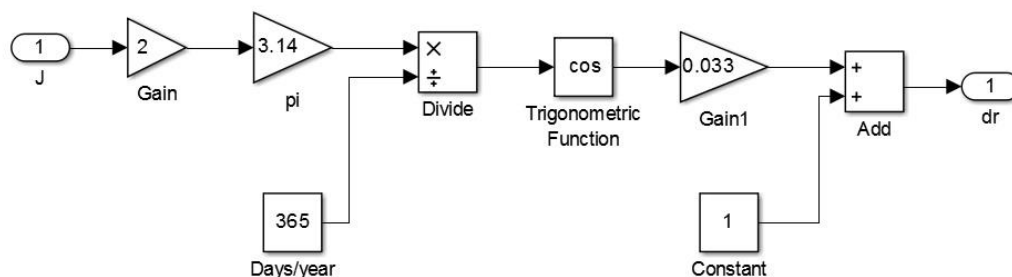


Εικόνα 5.22. Μοντέλο της εξωγήινης ακτινοβολίας.

5.2.1.18. Αντίστροφη σχετική απόσταση μεταξύ γης και ήλιου (Inverse relative distance Earth-Sun)

Η αντίστροφη σχετική απόσταση μεταξύ γης και ήλιου d_r , (inverse relative distance Earth-Sun), δίνεται από τη σχέση:

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (3.54)$$

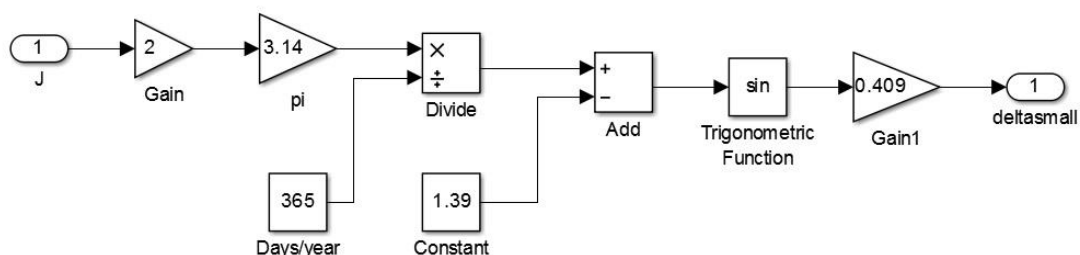


Εικόνα 5.23. Μοντέλο της αντίστροφης σχετικής απόστασης μεταξύ γης και ηλίου.

5.2.1.19. Ηλιακή απόκλιση (Solar declination)

Η ηλιακή απόκλιση δ , δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right), \text{ σε rad} \quad (3.55)$$

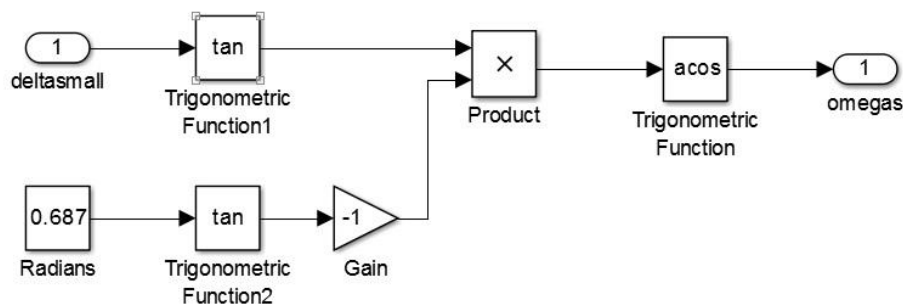


Εικόνα 5.24. Μοντέλο της ηλιακής απόκλισης.

5.2.1.20. Γωνία ώρας δύσης του ήλιου (Sunset hour angle)

Η γωνία ώρας δύσης του ήλιου ω_s , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)], \text{ σε rad (3.56)}$$



Εικόνα 5.25. Μοντέλο της γωνίας ώρας δύσης ηλίου.

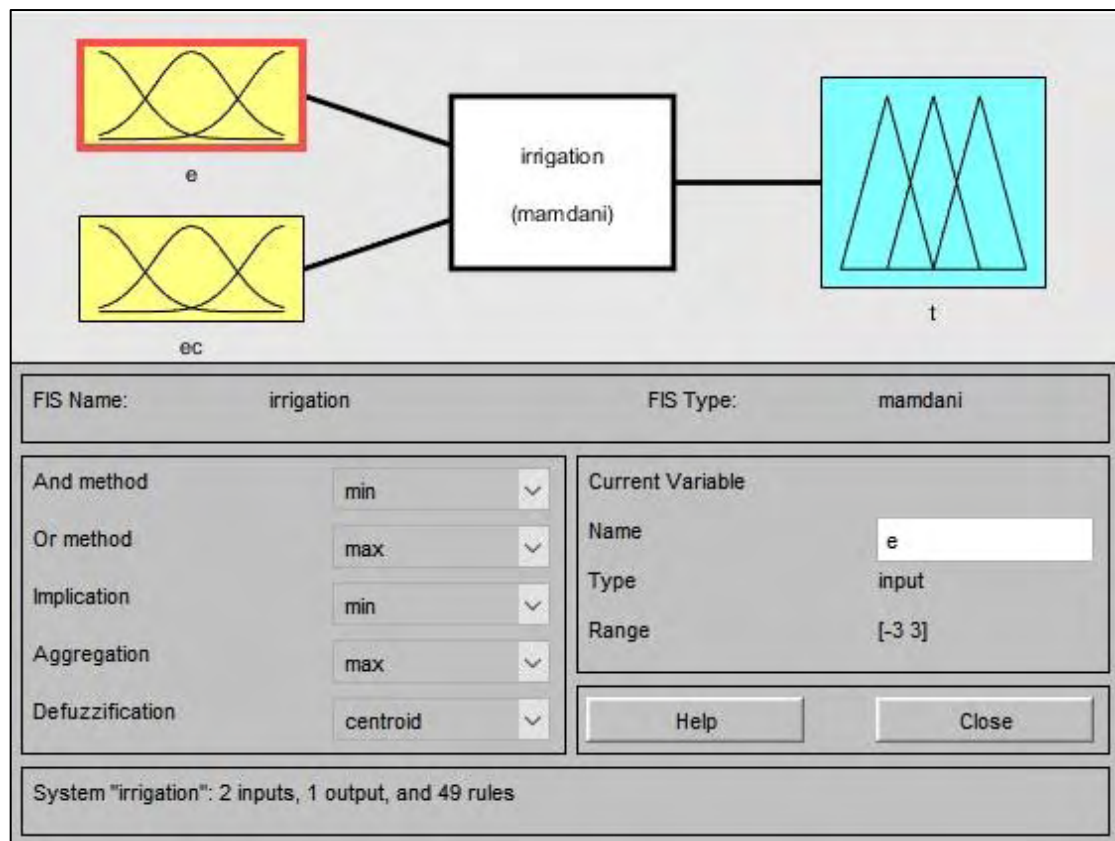
5.2.2. Μοντέλο του ασαφούς ελεγκτή στην εργαλειοθήκη Ασαφούς Λογικής του MATLAB

5.2.2.1. Καθορισμός βασικών στοιχείων του ασαφούς ελεγκτή

Ο σχεδιασμός του ασαφούς ελεγκτή ή αλλιώς του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων, διεξήχθη στο λογισμικό MATLAB χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής.

Η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του MATLAB αποτελείται από ένα φιλικό στο χρήστη, γραφικό περιβάλλον. Αφού πρώτα εκτελεστεί το MATLAB, στη συνέχεια στο παράθυρο εντολών (command window) του προγράμματος πληκτρολογείται “fuzzy”. Κατά την εκτέλεση της εντολής, εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνα 5.26.

Από προεπιλογή, η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής ανοίγει ένα νέο ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων τύπου Mamdani. Εναλλακτικά, από το μενού της εφαρμογής, ακολουθώντας τη διαδρομή File>New FIS, υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγεί ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων τύπου Sugeno. Στην παρούσα εργασία, για τις ανάγκες του πειράματος έχει επιλεγεί ως κατάλληλη η χρήση ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων τύπου Mamdani.



Εικόνα 5.26. Κεντρική καρτέλα του γραφικού περιβάλλοντος του MATLAB για το σχεδιασμό ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα αποτελείται από δύο εισόδους την e (σφάλμα) και την ec (μεταβολή του σφάλματος) και από μια έξοδο την t (διάρκεια άρδευσης). Από προεπιλογή, η εφαρμογή προτείνει ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων με μια είσοδο και μια έξοδο. Έτσι, εισήχθη άλλη μια είσοδος, ακολουθώντας τη διαδρομή Edit>Add Variable>Input, από το μενού της εφαρμογής.

Ύστερα, μετονομάστηκαν οι είσοδοι και η έξοδος σε e , ec και t αντίστοιχα και επιλέχθηκε το εύρος τιμών της κάθε παραμέτρου. Επίσης, στην ίδια καρτέλα επιλέχθηκαν κάποιες λειτουργικές παράμετροι.

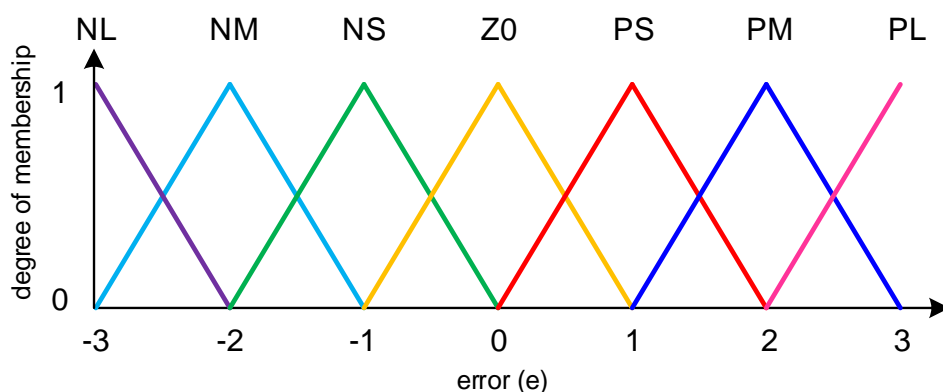
Ως “and method” επιλέχθηκε η \min (τελεστής ελαχίστου Mamdani), ως “or method” επιλέχθηκε η \max (τελεστής μεγίστου Mamdani), ως μέθοδος σημαντικότητας (implication) επιλέχθηκε η \min και ως μέθοδος συνάθροισης (aggregation) επιλέχθηκε η \max . Για την αποασαφοποίηση των τιμών επιλέχθηκε η κεντροειδής μέθοδος (centroid defuzzification).

5.2.2.2. Καθορισμός των υπερσυνόλων αναφοράς

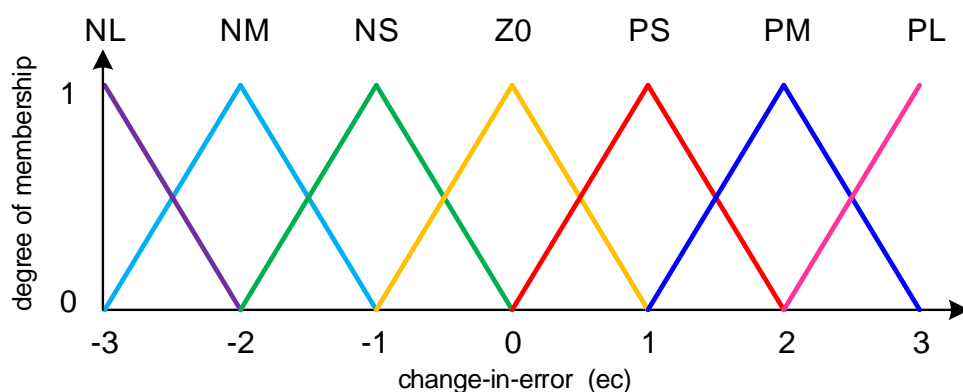
Οι τιμές των e και ec πριν οδηγηθούν ως είσοδοι στον ασαφή ελεγκτή, πρέπει πρώτα να ποσοτικοποιηθούν.

Η ποσοτικοποίηση (quantification) βοηθά στην απλοποίηση της επεξεργασίας των τιμών από το χρήστη καθώς επίσης στην ευκολότερη και πιο αποτελεσματική επιλογή των ασαφών κανόνων.

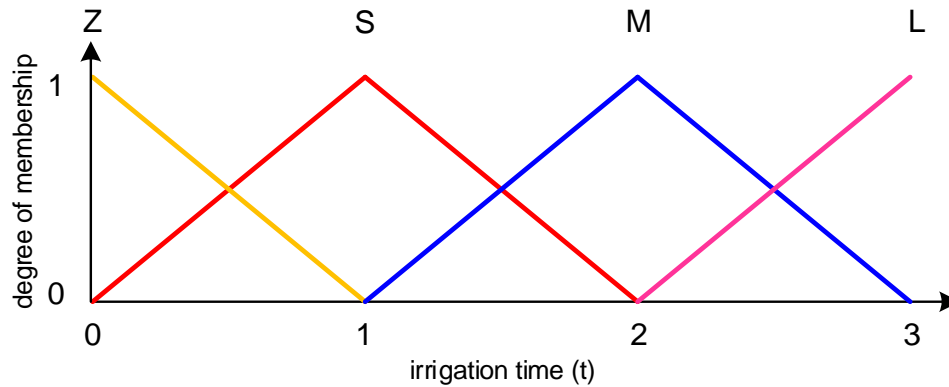
Συνηθίζεται, οι είσοδοι, στην προκειμένη περίπτωση το e και το ec , να ποσοτικοποιούνται στο ίδιο εύρος τιμών, ασχέτως αν το αρχικό του εύρος τιμών είναι διαφορετικό.



Εικόνα 5.27 Συναρτήσεις συμμετοχής του σφάλματος e .



Εικόνα 5.28. Συναρτήσεις συμμετοχής του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος ec .



Εικόνα 5.29. Συναρτήσεις συμμετοχής της διάρκειας άρδευσης t .

Επίσης, η έξοδος επειδή δε μπορεί να έχει αρνητικές τιμές, το εύρος τιμών της ποσοτικοποιείται ως προς το πάνω (θετικό) όριο.

Επομένως, το αρχικό εύρος του υπερσυνόλου αναφοράς των πραγματικών τιμών του e είναι $[-8, 8]$, του e_c είναι $[-3, 3]$ και του t είναι $[0, 3]$.

Η χρήση των τελεστών k_e , k_{ec} και k_t είναι απαραίτητη για την ποσοτικοποίηση των μεγεθών e , e_c και t αντίστοιχα έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε στρογγυλοποιημένο εύρος αριθμών.

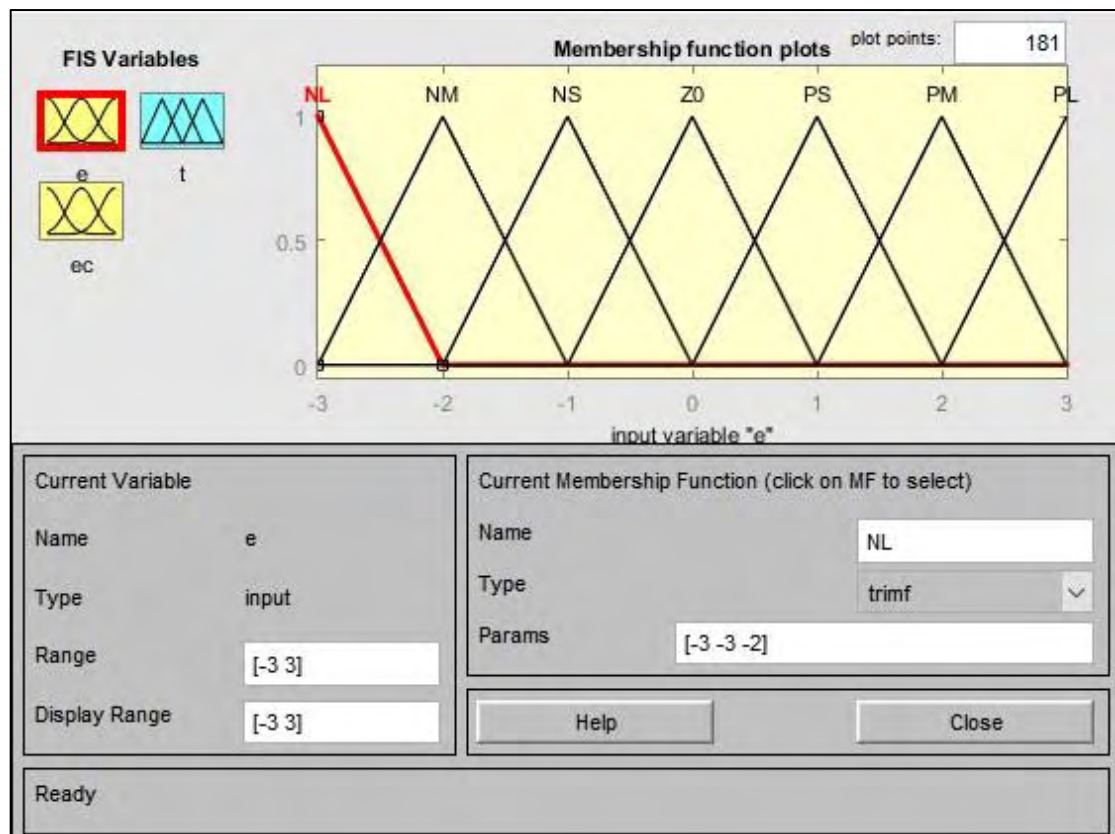
Το νέο, ποσοτικοποιημένο εύρος τιμών του e και e_c , πρέπει να είναι $[-3, 3]$, ενώ του t είναι $[0, 3]$. Άρα, οι κατάλληλες τιμές των τελεστών θα είναι: $k_e=3/8=0.375$, $k_{ec}=1$ και $k_t=3$.

Ο ασαφής διαχωρισμός σε υποκατηγορίες του e και e_c είναι: {Negative-Large, Negative-Medium, Negative-Small, Zero, Positive-Small, Positive-Medium, Positive-Large}, αντίστοιχα {NL, NM, NS, 0, PS, PM, PL}.

Ο ασαφής διαχωρισμός σε υποκατηγορίες του t είναι {Zero, Small, Medium, Large}, αντίστοιχα {0, S, M, L}.

α) Υπερσύνολο αναφοράς του σφάλματος e

Κάνοντας διπλό κλικ στην είσοδο e , εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα, στην οποία ορίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής.



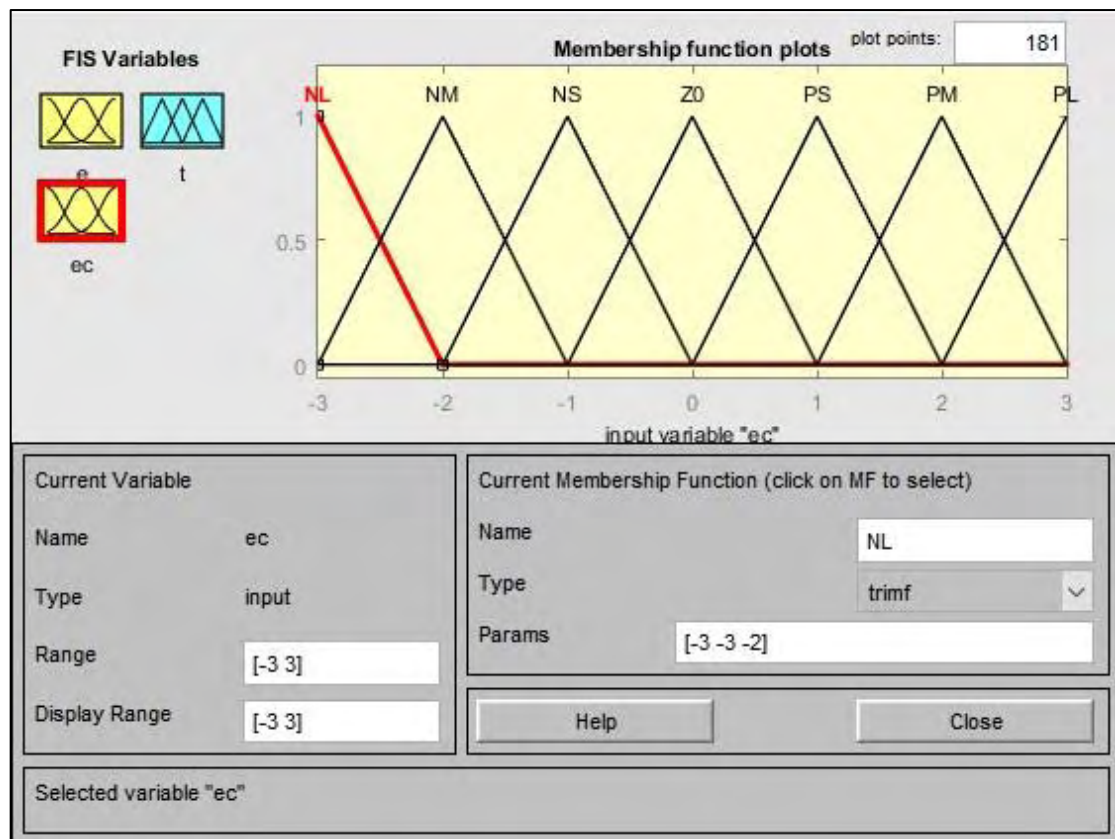
Εικόνα 5.30. Καρτέλα καθορισμού των συναρτήσεων συμμετοχής του σφάλματος e .

Το υπερσύνολο αναφοράς του e αποτελείται από επτά συναρτήσεις συμμετοχής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και έχει εύρος τιμών $[-3, 3]$.

Χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής

β) Υπερσύνολο αναφοράς της μεταβολής του σφάλματος ec

Κάνοντας διπλό κλικ στην είσοδο e , εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα, στην οποία ορίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής.

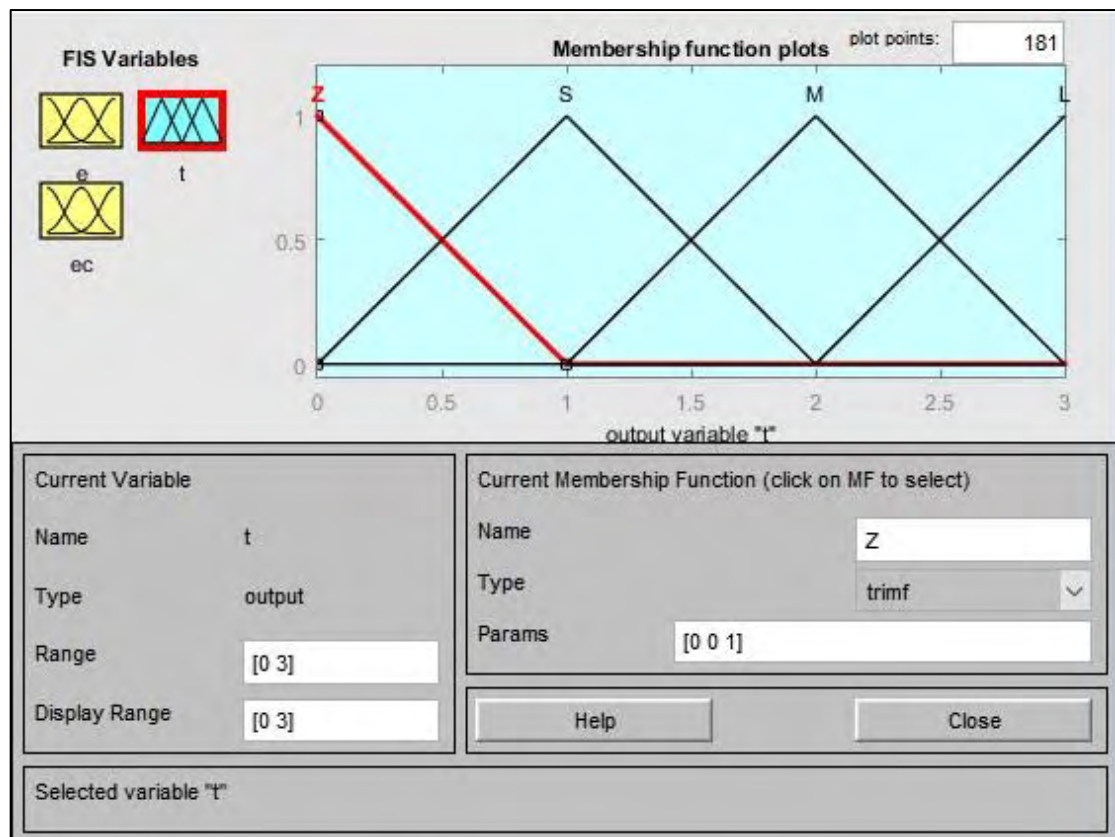


Εικόνα 5.31. Καρτέλα καθορισμού των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβολής του σφάλματος ec .

Το υπερσύνολο αναφοράς του ec αποτελείται από επτά συναρτήσεις συμμετοχής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και έχει εύρος τιμών $[-3, 3]$. Χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής

γ) Υπερσύνολο αναφοράς του χρόνου άρδευσης t

Κάνοντας διπλό κλικ στην έξοδο t , εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα, στην οποία ορίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 5.32. Καρτέλα σχεδίασης των συναρτήσεων συμμετοχής του χρόνου άρδευσης t.

Το υπερσύνολο αναφοράς του t αποτελείται από τέσσερις συναρτήσεις συμμετοχής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και έχει εύρος τιμών [0, 3]. Χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής

5.2.2.3. Σύνταξη των ασαφών κανόνων

Σύμφωνα με τους Passino και Yurkovich (1998), αν χρησιμοποιηθούν όλοι οι όροι υποθέσεων (premise terms) οι οποίοι προκύπτουν από τις συναρτήσεις συμμετοχής, κάθε κανόνας αποτελείται από κάθε πιθανό συνδυασμό των στοιχείων των υποθέσεων (premise elements), τότε μπορούν να συνταχθούν

$$\prod_{i=1}^n N_i = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_n \quad (3.57)$$

κανόνες στη βάση κανόνων (rule-base). Έτσι, εφόσον στην παρούσα εφαρμογή ισχύει $n=2$ είσοδοι και υπάρχουν $N_i=7$ συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε υπερσύνολο αναφοράς (universe of discourse), τότε μπορούν να συνταχθούν $7 \times 7 = 49$ πιθανοί κανόνες.

Συνοψίζοντας, οι κανόνες ελέγχου φαίνονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Πίνακας συνδυασμών για τη σύνταξη ασαφών κανόνων.

		ec						
		NL	NM	NS	Z0	PS	PM	PL
e	NL	L	L	L	M	M	M	Z
	NM	L	L	M	M	M	Z	S
	NS	L	L	Z	Z	Z	S	M
	Z0	L	M	Z	Z	S	Z	Z
	PS	M	S	Z	S	Z	Z	Z
	PM	S	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PL	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z

Αναλυτικά, οι 49 λεκτικοί κανόνες οι οποίοι προκύπτουν είναι:

Πίνακας 5.3. Πίνακας ασαφών κανόνων

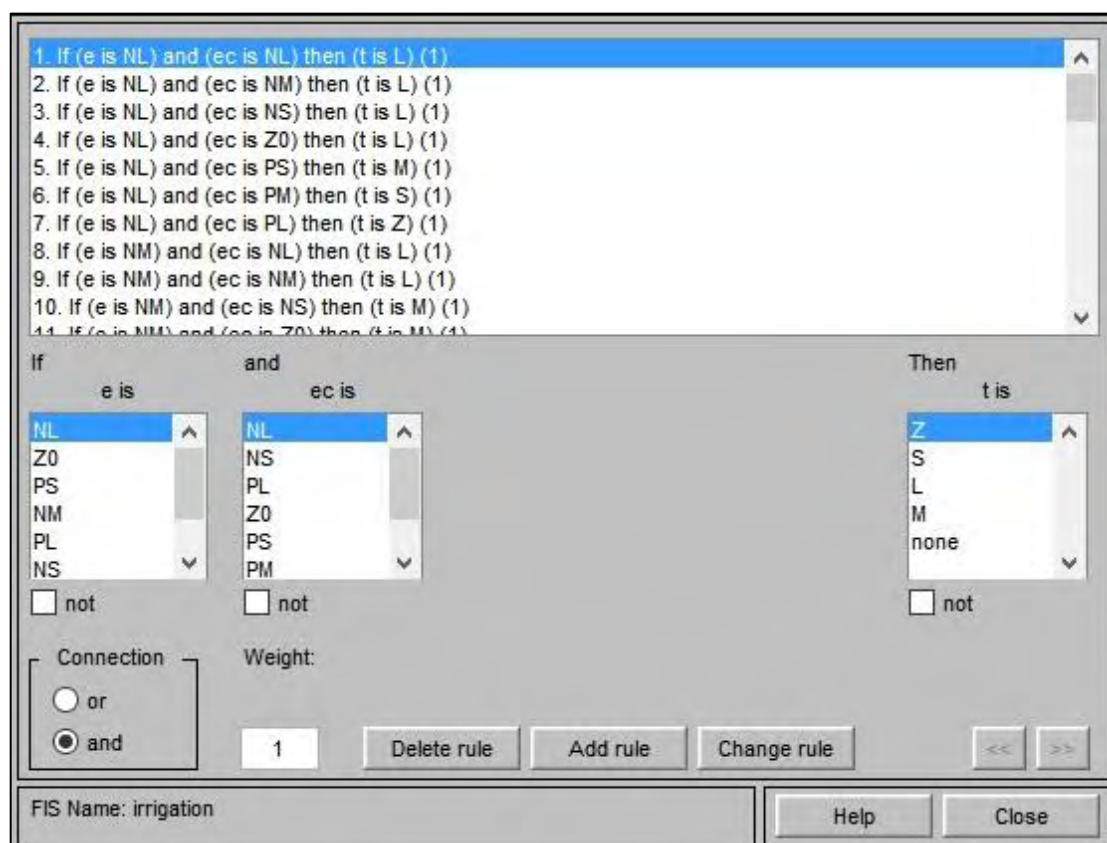
1. If e is NL and ec is NL then t is L	26. If e is Z0 and ec is PS then t is S
2. If e is NL and ec is NM then t is L	27. If e is Z0 and ec is PM then t is Z
3. If e is NL and ec is NS then t is L	28. If e is Z0 and ec is PL then t is Z
4. If e is NL and ec is Z0 then t is M	29. If e is PS and ec is NL then t is M
5. If e is NL and ec is PS then t is M	30. If e is PS and ec is NM then t is S
6. If e is NL and ec is PM then t is M	31. If e is PS and ec is NS then t is Z
7. If e is NL and ec is PL then t is Z	32. If e is PS and ec is Z0 then t is S
8. If e is NM and ec is NL then t is L	33. If e is PS and ec is PS then t is Z
9. If e is NM and ec is NM then t is L	34. If e is PS and ec is PM then t is Z
10. If e is NM and ec is NS then t is M	35. If e is PS and ec is PL then t is Z
11. If e is NM and ec is Z0 then t is M	36. If e is PM and ec is NL then t is S
12. If e is NM and ec is PS then t is M	37. If e is PM and ec is NM then t is Z
13. If e is NM and ec is PM then t is Z	38. If e is PM and ec is NS then t is Z
14. If e is NM and ec is PL then t is S	39. If e is PM and ec is Z0 then t is Z
15. If e is NS and ec is NL then t is L	40. If e is PM and ec is PS then t is Z
16. If e is NS and ec is NM then t is L	41. If e is PM and ec is PM then t is Z
17. If e is NS and ec is NS then t is Z	42. If e is PM and ec is PL then t is Z
18. If e is NS and ec is Z0 then t is Z	43. If e is PL and ec is NL then t is Z
19. If e is NS and ec is PS then t is Z	44. If e is PL and ec is NM then t is Z
20. If e is NS and ec is PM then t is S	45. If e is PL and ec is NS then t is Z
21. If e is NS and ec is PL then t is M	46. If e is PL and ec is Z0 then t is Z
22. If e is Z0 and ec is NL then t is L	47. If e is PL and ec is PS then t is Z
23. If e is Z0 and ec is NM then t is M	48. If e is PL and ec is PM then t is Z
24. If e is Z0 and ec is NS then t is Z	49. If e is PL and ec is PL then t is Z
25. If e is Z0 and ec is Z0 then t is Z	

Ο πίνακας ασαφών κανόνων συντάσσεται αναλόγως με τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών στα διάφορα στάδια ανάπτυξης σε συνδυασμό με το απόσταγμα της εμπειρίας των ειδικών εμπειρογνομόνων σε θέματα άρδευσης.

Για τη σύνταξη των κανόνων ακολουθείται η διαδρομή Edit>Rules, από το μενού της εφαρμογής και εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα (Εικόνα 5.33).

Στη συνέχεια, από τα κυλιόμενα μενού των εισόδων και των εξόδων επιλέγουμε τις λεκτικές μεταβλητές και σχηματίζουμε τους ασαφείς κανόνες, σύμφωνα με τον Πίνακας 5.3.

Οι κανόνες αυτοί αποθηκεύονται στη βάση κανόνων (rule base) και αλληλεπιδρούν με τον ασαφή μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων.



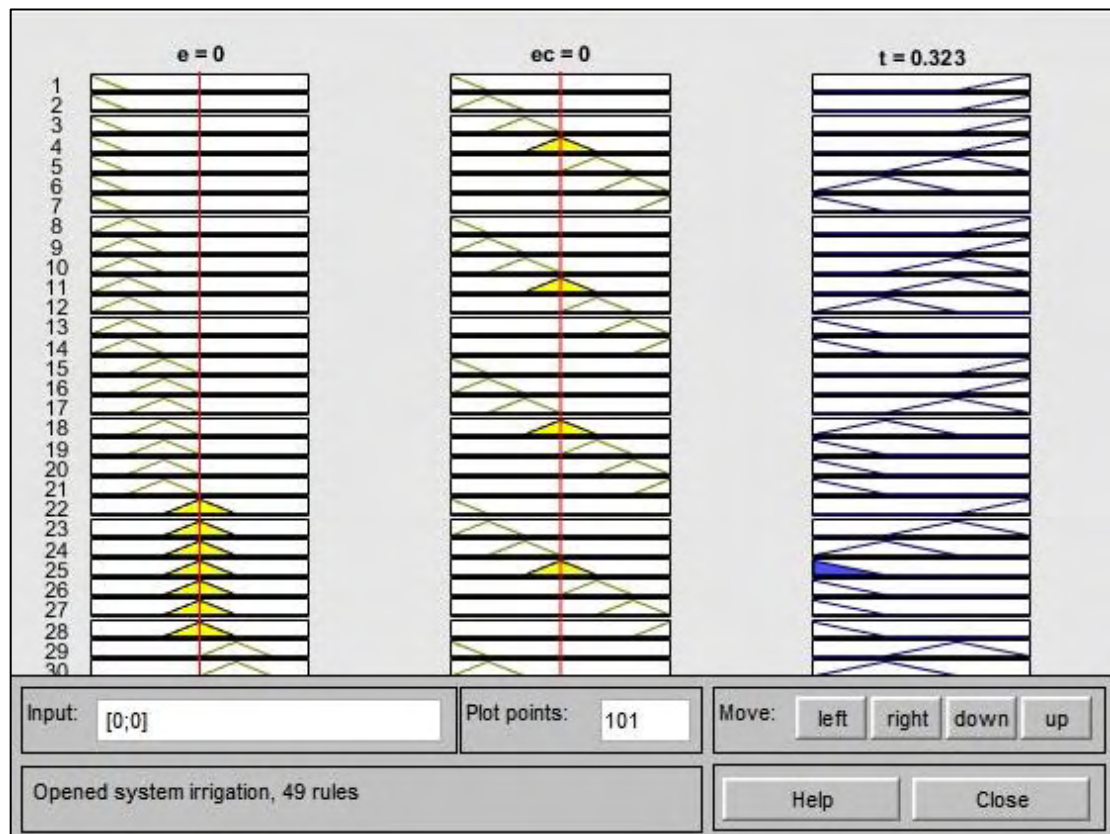
Εικόνα 5.33. Καρτέλα σύνταξης των ασαφών κανόνων-Βάση κανόνων.

5.2.2.4. Παρακολούθηση κανόνων ελέγχου

Κατά τη διεξαγωγή της προσομοίωσης είναι εφικτή η εποπτεία της διαδικασίας της μεταβολής των τιμών της εξόδου κατά τις αντίστοιχες μεταβολές των τιμών

των εισόδων. Η εφαρμογή επισκόπησης κανόνων (Rule viewer) εμφανίζει έναν χάρτη πορείας της όλης διαδικασίας εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων. Εκτελείται αυτόματα κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης και παρουσιάζει σε πραγματικό χρόνο πως οι βαθμοί συμμετοχής σε κάθε βήμα επηρεάζουν την έξοδο. Η καρτέλα εμφανίζει ξεχωριστά παράθυρα διαγραμμάτων ένθετα σε αυτή.

Τα τρία διαγράμματα στη αρχή της καρτέλας αντιπροσωπεύουν το υποθετικό μέρος και το συμπέρασμα του πρώτου κανόνα. Κάθε κανόνας είναι μια σειρά διαγραμμάτων και κάθε στήλη είναι μια μεταβλητή. Ο αύξων αριθμός κάθε κανόνα εμφανίζεται στην αριστερή πλευρά κάθε σειράς.



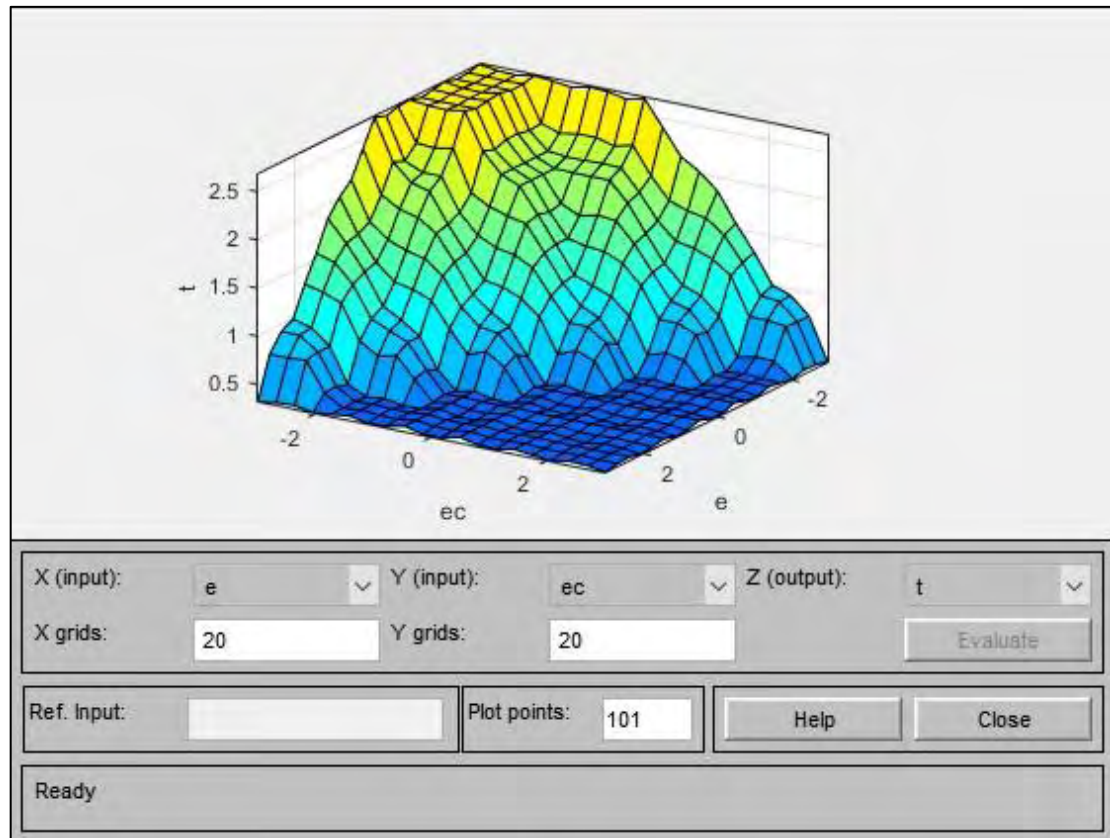
Εικόνα 5.34. Καρτέλα επισκόπησης των κανόνων ελέγχου.

5.2.2.5. Απεικόνιση της επιφάνειας ελέγχου

Η επιφάνεια ελέγχου είναι μια τρισδιάστατη γραφική παράσταση η οποία αναπαριστά τη χαρτογράφηση από το e , το ec και το t .

Η επιφάνεια ελέγχου απεικονίζει την τιμή εξόδου για οποιοδήποτε συνδυασμό των δύο τιμών εισόδου.

Ο άξονας x αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή εισόδου e , ο άξονας y αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή εισόδου ec και ο άξονας z αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή εξόδου t .



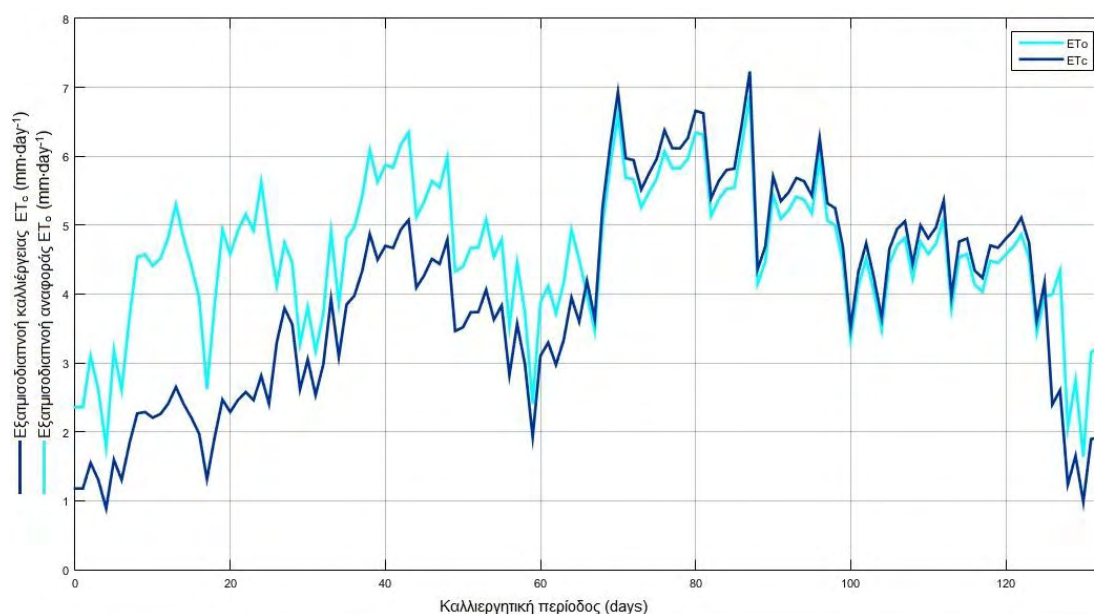
Εικόνα 5.35. Καρτέλα απεικόνισης της επιφάνειας ελέγχου του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.

6. Αποτελέσματα και συζήτηση

6.1. Αποτελέσματα

Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της προσομοίωσης, οι εικονικοί παλμογράφοι (scores) που βρίσκονται συνδεδεμένοι σε διάφορα σημεία του μοντέλου του συστήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5 καταγράφουν κάποιες γραφικές παραστάσεις (κυματομορφές).

Ο παλμογράφος με εισόδους την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o και την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c , κατέγραψε τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της ET_o (γαλάζια) και της ET_c (μπλέ), όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 6.1. Όπως είναι απολύτως αναμενόμενο, αυτές παρουσιάζουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους, καθώς ο συντελεστής καλλιέργειας K_c ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o , παίρνει τιμές από 0.5 έως 1.05 για την συγκεκριμένη υποθετική καλλιέργεια, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ET_c σε κάποια στάδια της καλλιεργητικής περιόδου να έχει μικρότερες και άλλοτε μεγαλύτερες τιμές από την ET_o .



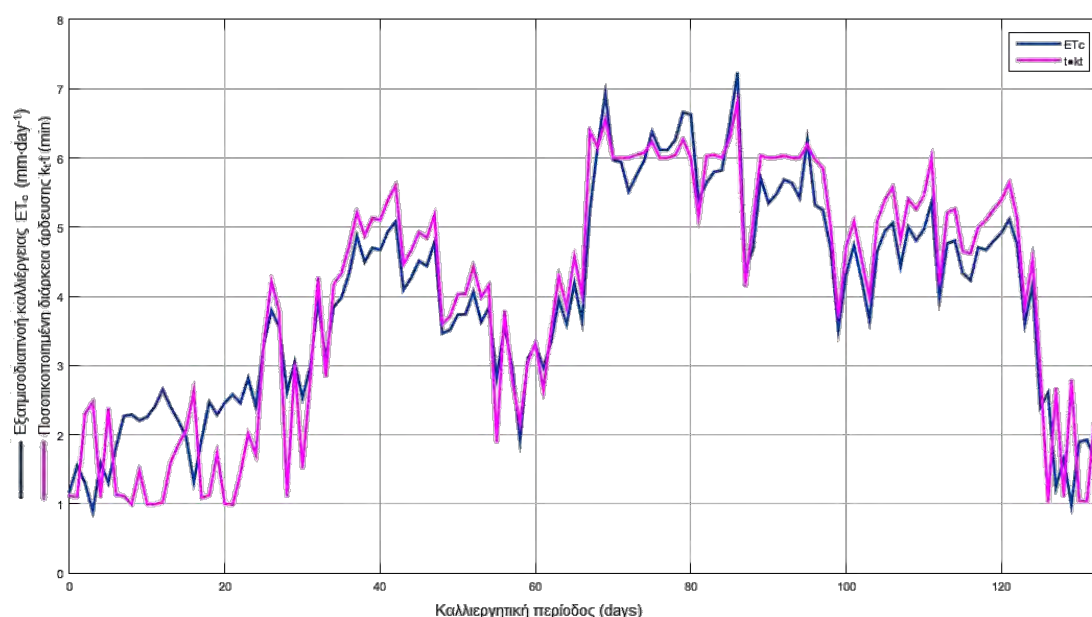
Εικόνα 6.1. Γραφικές παραστάσεις της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o και της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c .

Κατά τη διαδικασία σχεδίασης του μοντέλου του συστήματος χρειάστηκε να γίνουν πολλές αλλαγές στους ασαφείς κανόνες του ελεγκτή και

επαναλαμβανόμενες δοκιμές προσομοίωσης ώστε να επιτευχθεί η σωστή ρύθμισή του και η απόκριση του στους επιθυμητούς στόχους.

Συγκεκριμένα, η διάρκεια άρδευσης αυξάνεται και μειώνεται όταν αυξάνεται και μειώνεται αντίστοιχα η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, σε ποσοστό το οποίο καθορίζεται από τους ασαφείς κανόνες του ασαφούς ελεγκτή.

Στην γραφική παράσταση που φαίνεται στην Εικόνα 6.2 η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας παρουσιάζεται με μπλε χρώμα και η διάρκεια άρδευσης t με κυανό.



Εικόνα 6.2. Γραφικές παραστάσεις της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c και της ποσοτικοποιημένης διάρκειας άρδευσης kt .

Το βασικότερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι καθώς το σύστημα αυτό ενεργοποιείται, ώστε να διαχειρίζεται αυτόματα την άρδευση της καλλιέργειας, δε χρειάζεται να τροποποιείται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς έχει καθοριστεί να ρυθμίζεται μια φορά και να δουλεύει μόνο του υπό όλες τις συνθήκες.

Επίσης, είναι χρήσιμο να ληφθεί υπόψη ότι για λόγους απλοποίησης στο σχεδιασμό του μοντέλου του συστήματος, δεν υπολογίζεται το νερό που είναι πιθανό να εισέλθει στο έδαφος λόγω βροχοπτώσεων.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής μέσω του MATLAB/Simulink πραγματοποιείται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, καθώς όλα τα δεδομένα τα οποία

παρέχονται για τον υπολογισμό της είναι πραγματικά, προερχόμενα από μετεωρολογικό σταθμό.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του συστήματος πραγματοποιήθηκαν επίσης κάποιοι υπολογισμοί στο excel.

Αρχικά, υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κάθε ημέρας, με τη χρήση των ίδιων μαθηματικών σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο Simulink και αποδείχτηκε ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν απόλυτα με τις τιμές που υπολογίζει το πρόγραμμα για τα αντίστοιχα βήματα χρόνου.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ακριβής, απαιτούμενη διάρκεια άρδευσης για κάθε μέρα, σύμφωνα με τη σχέση 2.9.

Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών θεωρήθηκε ότι το εμβαδό της αρδευόμενης έκτασης είναι 1 στρέμμα (1000 m^2) και η διαθέσιμη παροχή αρδευτικού νερού είναι ικανή να προσφέρει σταθερά $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Η διάρκεια άρδευση που υπολογίστηκε με αυτό τον τρόπο για κάθε ημέρα είναι ικανή ώστε να αναπληρώνει στο 100% το νερό που χάνεται.

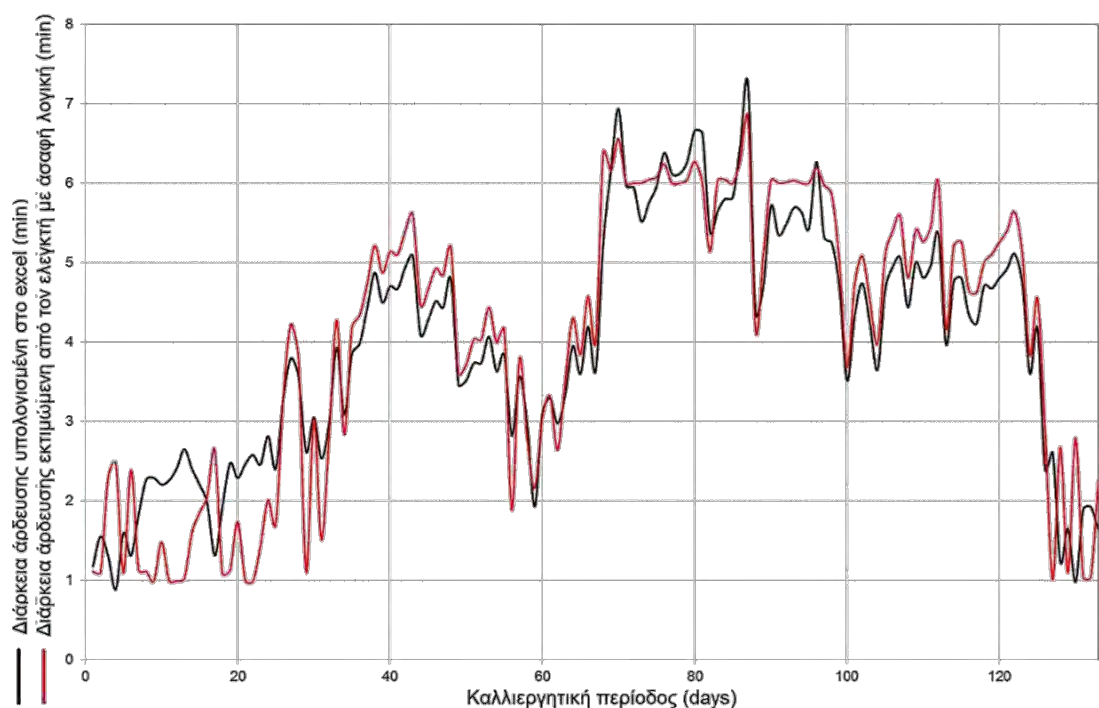
Οι τιμές των αποτελεσμάτων των υπολογισμών της διάρκειας άρδευσης που υπολογίστηκαν από το excel και οι τιμές των αποτελεσμάτων της διάρκειας άρδευσης που υπολογίστηκαν από το από τον ασαφή ελεγκτή στο MATLAB/Simulink, χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του γραφήματος που φαίνεται στην Εικόνα 6.3.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για δεδομένη σταθερή παροχή νερού, η διάρκεια άρδευσης t μεταβάλλεται έτσι ώστε να ακολουθεί τις αντίστοιχες μεταβολές της εξατμισοδιαπνοής.

Στην εικόνα 6.3 παρατηρούμε ότι η διάρκεια άρδευσης που εκτιμάται από σύστημα ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική με τη συμβολή του λογισμικού MATLAB/Simulink ανταποκρίνεται σε μεγάλο βαθμό στη διάρκεια άρδευσης που απαιτείται θεωρητικά.

Δηλαδή, χωρίς τη χρήση ακριβούς μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού του απαιτούμενου χρόνου άρδευσης αλλά με τη σύνταξη κανόνων ασαφούς λογικής και με εισόδους το σφάλμα e και το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος

ες, είναι εφικτό να επιτευχθούν αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά που προκύπτουν με ακριβείς υπολογισμούς.



Εικόνα 6.3. Σύγκριση διάρκειας άρδευσης υπολογισμένης θεωρητικά και διάρκειας άρδευσης υπολογισμένης μέσω κανόνων ασαφούς λογικής.

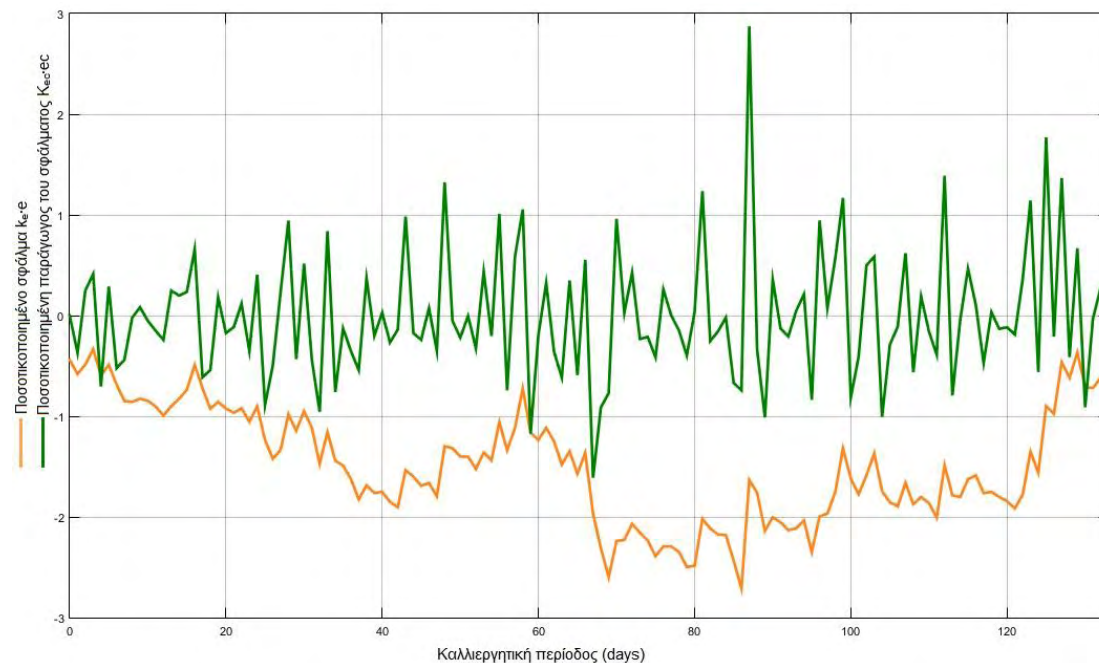
Έτσι, η λειτουργία του συστήματος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως εύρωστη. Παρόλα αυτά, οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται οφείλονται κατά κύριο λόγο στις απότομες αυξομειώσεις στις τιμές τις εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας.

Το ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων ανιχνεύει το ποσοστό κατά το οποίο μεταβάλλονται οι τιμές του σφάλματος e και της μεταβολής του σφάλματος ec και ρυθμίζει το ποσοστό της διάρκειας άρδευσης t στην έξοδο.

Μηδενική τιμή για το σφάλμα e σημαίνει ότι η μετρούμενη-πραγματική τιμή έχει γίνει ίση με την επιθυμητή τιμή, ενώ μηδενική τιμή για το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος σημαίνει ότι το παρόν σφάλμα δεν άλλαξε σημαντικά σε σχέση με το σφάλμα που μετρήθηκε στο προηγούμενο βήμα χρόνου.

Ως επιθυμητή τιμή εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας επιλέχθηκε η τιμή μηδέν γιατί σε μια καλλιέργεια το ζητούμενο είναι οι απώλειες υγρασίας να είναι μηδενικές, δηλαδή το υδατικό ισοζύγιο να είναι μηδενικό.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.4, όταν η μεταβολή του σφάλματος e_c (πράσινο) έχει αρνητικό πρόσημο, αυτό σημαίνει ότι η παρούσα τιμή του σφάλματος e (πορτοκαλί) έχει αυξηθεί συγκριτικά με την προηγούμενη τιμή του.



Εικόνα 6.4. Γραφικές παραστάσεις του ποσοτικοποιημένου σφάλματος $e \cdot k_e$ και της ποσοτικοποιημένης μεταβολής του σφάλματος $e_c \cdot k_{ec}$, αντίστοιχα.

Αντίστοιχα, όταν ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος e_c έχει θετικό πρόσημο, αυτό σημαίνει ότι η παρούσα τιμή του σφάλματος έχει μειωθεί συγκριτικά με την προηγούμενη τιμή του.

6.2. Συζήτηση

Το σύστημα ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική για τον αυτοματισμό ενός συστήματος άρδευσης το οποίο παρουσιάστηκε, βασίζεται στην στρατηγική αυτομάτου ελέγχου με πρόσθια-τροφοδότηση και χρησιμοποιείται για την εφαρμογή άρδευσης ώστε να αναπληρώσει το νερό που χρησιμοποιήθηκε από τα φυτά την προηγούμενη ημέρα, χρησιμοποιώντας την εξαμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c .

Επειδή η στρατηγική αυτομάτου ελέγχου με πρόσθια-τροφοδότηση αποτελεί στην ουσία έναν ελεγκτή ανοιχτού βρόχου, ως εκ τούτου παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι μπορούν να αρθούν με τη χρήση ανατροφοδότησης,

μαθηματικών μοντέλων και πρόσθετων πληροφοριών από μετρήσεις του συστήματος.

Τόσο κατά τον αυτόματο έλεγχο με ανατροφοδότηση όσο και για τον αυτόματο έλεγχο με πρόσθια-τροφοδότηση, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω της εξατμισοδιαπνοής αλλά και την αποφυγή της υπερλειτουργίας του συστήματος, το οποίο θα οδηγούσε σε σπατάλη νερού και ενέργειας, η άρδευση είναι καλό να προγραμματίζεται είτε το πρωί, πριν την ανατολή του ήλιου, ή αργά τη νύχτα (Spreetjens et al. 2008; Car et al. 2012).

Αντίστοιχες εργασίες οι οποίες έχουν παρουσιαστεί από άλλους ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη των φυτών παρουσιάζεται σαφώς μεγαλύτερη με τη χρήση ευφυών ελεγκτών ασαφούς λογικής παρά με τους συμβατικούς ON/OFF ελεγκτές άρδευσης.

Στην εργασία των Javadikia et al. (2009) ένας πρωτότυπος ασαφής ελεγκτής άρδευσης, φάνηκε να είναι πιο αποτελεσματικός σε σύγκριση με τους απλούς ON/OFF ελεγκτές με ανατροφοδότηση.

Επίσης, οι Rahangadale et al. (2011) ανέφεραν ότι ο ασαφής ελεγκτής με ασαφή λογική υπερέχει από τους συμβατικούς ελεγκτές ON/OFF. Ο ασαφής ελεγκτής δίνει ομαλή έξοδο που ανταποκρίνεται στο σφάλμα και μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των αυτόματων συστημάτων άρδευσης,

Επιπρόσθετα, μια προκαταρκτική μελέτη των Touati et al. (2013) έδειξε ότι σε σύγκριση με τις τρέχουσες τεχνικές άρδευσης στο Κατάρ (άρδευση με κατάκλιση και αυλάκια), το ευφυές σύστημα άρδευσης το οποίο βασίζεται σε ελεγκτή ασαφούς λογικής, εξοικονομεί έως και 80% της κατανάλωσης νερού, ίση με περίπου 1.521.320,00 L ετησίως σε έκταση 100 m².

7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε ένα σύστημα ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική για τον αυτοματισμό ενός συστήματος άρδευσης, με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση των υδατικών πόρων.

Η μέθοδος η οποία αναλύθηκε, προσαρμόζει αυτόματα τη διάρκεια άρδευσης στις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας.

Σε περιπτώσεις που ο μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται αρκετά μακριά από το χωράφι, η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής εμπεριέχει σίγουρα κάποιο ποσοστό ασάφειας.

Με το παρόν σύστημα τα μετεωρολογικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής μπορούν να προσαρμόζονται στην υπό μελέτη καλλιέργεια, τροποποιώντας κατάλληλα τους ασαφείς κανόνες ελέγχου.

Έτσι, πραγματοποιώντας αρκετές δοκιμές, μπορούμε να χρησιμοποιούμε την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής ως σημείο αναφοράς, να την προσαρμόζουμε στις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη καλλιέργεια και να αρδεύουμε αποτελεσματικά.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης διάρκειας άρδευσης εκτιμάται χωρίς τη χρήση ακριβούς μαθηματικού μοντέλου που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της συγκεκριμένης διεργασίας αλλά με τη σύνταξη ασαφών κανόνων ελέγχου.

Η σύνταξη των ασαφών κανόνων ελέγχου γίνεται εύκολα εφόσον αυτοί αναπαριστούν τον ανθρώπινο συλλογισμό. Η χρήση λεκτικών μεταβλητών αντί αριθμών προσφέρει μεγαλύτερη ευκολία στην κατανόηση της λειτουργίας του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.

Η αξιόπιστη λειτουργία του παρόντος συστήματος επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της σύγκρισης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιηθήκαν στο excel.

Η κυματομορφή της διάρκειας άρδευσης που εκτιμάται από τον ευφυή ελεγκτή άρδευσης με ασαφή λογική ακολουθεί την κυματομορφή της διάρκειας άρδευσης που υπολογίστηκε θεωρητικά στο excel.

Επειδή το σύστημα αυτό έχει ως στόχο να αναπληρώνει το νερό που χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, η εφαρμογή ευφυούς ελέγχου άρδευσης με ασαφή λογική εξασφαλίζει επαρκή ποσότητα νερού για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών.

Έτσι, αποφεύγεται η περίπτωση της υδατικής καταπόνησης που μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη μαρανση, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες όπου η εξατμισοδιαπνοή αγγίζει υψηλές τιμές.

Εφόσον η άρδευση των καλλιεργειών δεν απαιτεί απόλυτη ακρίβεια στην παροχή νερού, ένα σύστημα ευφυούς ελέγχου άρδευσης με ασαφή λογική μπορεί να διαχειριστεί ικανοποιητικά την άρδευση των καλλιεργειών. Μικρές αποκλίσεις στη διάρκεια της άρδευσης δεν επηρεάζουν άμεσα τις καλλιέργειες.

Γενικά, όπως προέκυψε από βιβλιογραφική αντιπαραβολή με παραπλήσια συστήματα, η εφαρμογή του ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική σε αρδευόμενες καλλιέργειες έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερης ποσότητας νερού σε σχέση με τους συμβατικούς ελεγκτές άρδευσης.

Άρα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση υδατικών πόρων και μεριμνάται η αιεφόρος διαχείριση του νερού άρδευσης.

Το σύστημα είναι ευσταθές με περιορισμένες ταλαντώσεις και αυτό οφείλεται στην επιλογή του ελεγκτή PD για τον έλεγχο της παρούσας διεργασίας.

Στους ασαφείς ελεγκτές PD η διόρθωση του σφάλματος e καθυστερεί κατά το χρόνο που ορίζεται από το σύστημα, λόγω του αναλογικού όρου P του ελεγκτή, ενώ η πρόβλεψη του μελλοντικού σφάλματος γίνεται με τη συμβολή του διαφορικού όρου D του ελεγκτή. Συνεπώς, η συμβολή του διαφορικού όρου του ελεγκτή είναι πολύ σημαντική για τον περιορισμό των ταλαντώσεων που παρουσιάζει η κυματομορφή της διάρκειας άρδευσης t .

Επιπλέον, το σύστημα επιτυγχάνει τη μείωση των σφαλμάτων στο μηδέν ή σε τιμές κοντά στο μηδέν, εφόσον αυτό αποτελεί απαίτηση για τη σωστή λειτουργία του συστήματος.

Επίσης, το παρόν σύστημα θα μπορούσε μελλοντικά να βελτιωθεί, ώστε να χρησιμοποιεί έναν πραγματικό ευφυή ελεγκτή με ασαφείς κανόνες στο MATLAB, όπως για παράδειγμα Arduino, Raspberry PI κ.α., και να λαμβάνει

δεδομένα εισόδου σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου οι οποίοι θα αποτελούν μέρος ενός αυτοσχέδιου μετεωρολογικού σταθμού.

Η χρήση εξοπλισμού και λογισμικού ανοιχτού κώδικα (open source) θα μπορούσε να προσφέρει ένα χαμηλού προϋπολογισμού σύστημα ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική το οποίο θα ήταν προσιτό για τον αυτοματισμό διαφόρων συστημάτων άρδευσης, τόσο για ερευνητικούς όσο και για επαγγελματικούς σκοπούς.

Επιπρόσθετα, η χρήση ανατροφοδότησης από έναν ή περισσότερους αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια και πιθανώς την ευστάθεια του συστήματος αυτομάτου ελέγχου.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αποφυγή άρδευσης όταν για οποιοδήποτε λόγο η πραγματική εδαφική υγρασία του εδάφους είναι υψηλή, παρόλο που έμμεσα, μέσω υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, μπορεί να έχει προκύψει μεγάλη απώλεια νερού.

Τέλος, το παρόν σύστημα προορίζεται για χρήση σε επιφανειακές αρδεύσεις και για καθημερινή άρδευση των καλλιεργειών. Πραγματοποιώντας τις απαραίτητες αλλαγές, το ίδιο σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες μεθόδους άρδευσης.

8. Βιβλιογραφία

- Ali, M.H., 2011. Practices of Irrigation & On-Farm Water Managment: Volume 2. Springer, New York.
- Ali, M.H., 2010a. Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management: Volume 1. Springer New York, New York, NY.
- Ali, M.H., 2010b. Practices of Irrigation & On-Farm Water Managment: Volume 1. Springer, New York.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Irrigation and Drainage 300, 300.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., 1986. Rational Use of The FAO Blaney- Criddle Formula. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 112, 139–155.
- Antsaklis, P.J., Passino, K.M., 1993. An Introduction to Intelligent and Autonomous Control. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.
- Bahat, M., Inbar, G., Yaniv, O., Schneider, M., 2000. Fuzzy Irrigation Controller System. Engineering Applications of Artificial Intelligence 13, 137–145.
- Bennett, S., 1996. A Brief History of Automatic Control. Control Systems, IEEE 16, 17–25.
- Boman, B., Smith, S., Tullos, B., 2015. Control and Automation in Citrus Microirrigation Systems. Agricultural and Biological Engineering Department, UF/IFAS Extension 1–15.
- Brouwer, C., Goffeau, A., Heibloem, M., 1985. Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation. Training Manual No.1, Training M. ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Brouwer, C., Heibloem, M., 1986. Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. Training manual No.3. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., Heibloem, M., 1990. Irrigation Water

- Management: Irrigation Methods. Training manual No.5. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Chartzoulakis, K., Bertaki, M., 2015. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4, 88–98.
- Cuming, K.J., 1990. Irrigation Control System. Patent No 4934400. 4934400.
- Dorf, R.C., Bishop, R.H., 2011. *Modern Control Systems*, 12th ed. Pearson Education, Inc, New Jersey.
- Dukes, M.D., Scholberg, J.M., 2005. Soil Moisture Controlled Subsurface Drip Irrigation on Sandy Soils. *Applied Engineering in Agriculture* 21, 89–101.
- Dukes, M.D., Simonne, E.H., Davis, W.E., Studstill, D.W., Hochmuth, R., 2003. Effect of Sensor-Based High Frequency Irrigation on Bell Pepper Yield and Water Use, in: *Proceedings of 2nd International Conference on Irrigation and Drainage*, May 12-15. Phoenix, AZ, pp. 665–674.
- EC, 2012. A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament.
- EC, 2007. Addressing the Challenge of Water Scarcity and Droughts in the European Union. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament.
- EC, 2000. Water Framework Directive-Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy.
- FAO, 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW)-Managing Systems at Risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.
- Feigenbaum, E., Barr, A., 1981. *The Handbook of Artificial Intelligence Volume I*. William Kaufmann, Inc., Los Altos, California.
- Fereres, E., Evans, R.G., 2006. Irrigation of Fruit Trees and Vines: An Introduction. *Irrigation Science* 24, 55–57.

- Fischbach, P.E., Thompson, T.L., Stetson, L.E., 1970. Electric Controls for Automatic Surface Irrigation Systems with Reuse System. Transactions of the ASAE 13, 0286–0288.
- Frankovitch, D.J., Sarich, J.I., 1991. Automatic Plant Watering System. Patent No CA 2012650.
- Ge, Z., Zhang, R., Yu, Y., Wu, W., 2013. An Automatic Plant Irrigation System Based on Fuzzy Control. Applied Mechanics and Materials 303-306, 1162–1166.
- Goodwin, G.C., Graebe, S.F., Salgado, M.E., 2000. Control System Design, 1st ed. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Gravalos, I., Gialamas, T., Kateris, D., Xyradakis, P., Tsiropoulos, Z., Ralli, M., 2007. A Control System to Achieve Optimum Soil Water Conditions for Plant Growth, in: 3rd International Conference TAE2007, Czech University of Life Sciences Prague 12-14 September 2007, Prague, Czech Republic. pp. 115–120.
- Greenwood, D.J., Zhang, K., Hilton, H.W., Thompson, A.J., 2009. Opportunities for Improving Irrigation Efficiency with Quantitative Models, Soil Water Sensors and Wireless Technology. The Journal of Agricultural Science 148, 1–16.
- Hanss, M., 2005. Applied Fuzzy Arithmetic: An Introduction with Engineering Applications. Springer Berlin Heidelberg, Berlin-Heidelberg.
- Hopgood, A.A., 2012. Intelligent Systems for Engineers and Scientists, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- ICID/FAO, 1995. Irrigation Scheduling: From Theory to Practice : Proceedings of the ICID/FAO Workshop on Irrigation Scheduling, Rome, Italy, 12-13 September 1995. Rome.
- Irmak, S., Haman, D.Z., 2001. Performance of the Watermark Granular Matrix Sensor in Sandy Soils. Applied Engineering in Agriculture 17, 787–795.
- Jackson, P., 1998. Introduction to Expert Systems, 3rd ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.

- Jager, R., 1995. Fuzzy Logic in Control. PhD Thesis. Technische Universiteit Delft.
- Jang, J.-S.R., Sun, C.-T., Mizutani, E., 1997. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, NJ.
- Jantzen, J., 2013. Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach, 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Javadikia, P., Tabatabaeefar, A., Omid, M., Alimardani, R., Naderloo, L., 2009. Intelligent Control Based Fuzzy Logic for Automation of Greenhouse Irrigation System and Evaluation in Relation to Conventional Systems. World Applied Sciences Journal 6, 16–23.
- Ji, R., Qi, L., Huo, Z., 2012. Design of Fuzzy Control Algorithm for Precious Irrigation System in Greenhouse, in: Li, D., Chen, Y. (Eds.), CCTA 2011, Part III, IFIP AICT 370. IFIP International Federation for Information Processing, pp. 278–283.
- Katerji, N., Mastrorilli, M., Rana, G., 2008. Water Use Efficiency of Crops Cultivated in the Mediterranean Region: Review and Analysis. European Journal of Agronomy 28, 493–507.
- Klir, G.J., Yuan, B., 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, NJ.
- Lukangu, G., Savage, M.J., Johnston, M.A., 1999. Use of Sub-Hourly Soil Water Content Measured with a Frequency-Domain Reflectometer to Schedule Irrigation of Cabbages. Irrigation Science 19, 7–13.
- Malicki, M.A., Skierucha, W.M., 1989. A Manually Controlled TDR Soil Moisture Meter Operating With 300 ps Rise-Time Needle Pulse. Irrigation Science 10, 153–163.
- Mamdani, E.H., Assilian, S., 1975. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies 7, 1–13.
- MathWorks, 2016. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. The MathWorks, Inc, Natick, MA.

- MathWorks, 2015. Simulink User's Guide. The MathWorks, Inc, Natick, MA.
- MathWorks, 2008. MATLAB 7 Getting Started Guide. The MathWorks, Inc, Natick, MA.
- McCarthy, N., Lipper, L., Branca, G., 2011. Climate-Smart Agriculture: Smallholder Adoption and Implications for Climate Change Adaptation and Mitigation (No. 4), Mitigation of Climate Change in Agriculture Series. Rome, Italy.
- McCulloch, W.S., Pitts, W., 1943. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics 5, 115–133.
- Meron, M., Hallel, R., Bravdo, B., Wallach, R., 2001. Tensiometer Actuated Automatic Micro Irrigation of Apples, in: ISHS Acta Horticulturae 562: III International Symposium on Sensors in Horticulture. pp. 63–69.
- Mousa, A.K., Croock, M.S., Abdullah, M.N., 2014. Fuzzy Based Decision Support Model for Irrigation System Management. International Journal of Computer Applications 104, 14–20.
- Mudgal, S., Tan, A., Lockwood, S., Eisenmenger, N., Fischer-Kowalski, M., Giljum, S., Brûcker, M., 2012. Assessment of Resource Efficiency Indicators and Targets. Final Report Prepared for the European Commission, DG Environment. Paris.
- Passino, K.M., Yurkovich, S., 1998. Fuzzy Control. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., California.
- Pedrycz, W., Gomide, F., 2007. Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Phene, C.J., Hoffman, G.J., Rawlins, S.L., 1971. Measuring Soil Matric Potential in situ by Sensing Heat Dissipation within a Porous Body: I. Theory and Sensor Construction¹. Soil Science Society of America Journal 35, 27.
- Rahangadale, V.S., Choudhary, D.S., 2011. On Fuzzy Logic based Model for Irrigation Controller using Penman-Monteith Equation. IJCA Proceedings on 2nd National Conference on Information and Communication Technology NCICT, 22–25.

- Romero, R., Muriel, J.L., Garcia, I., Munoz de la Pena, D., Iliev, O.L., Sazdov, P., Zakeri, A., 2012. Research on Automatic Irrigation Control: State of the Art and Recent Results. *Agricultural Water Management* 114, 59–66.
- Ross, T.J., 2010. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, GB.
- Ruiz-Sanchez, M.C., Domingo-Miguel, R., Castel-Sanchez, J.R., 2010. Review. Deficit Irrigation in Fruit Trees and Vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8, 5–20.
- Sadler, E.J., Evans, R.G., Stone, K.C., Camp, C.R., 2005. Opportunities for Conservation with Precision Irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation* 60, 371–378.
- Singh, S.N., Jha, R., Nandwana, M.K., 2012. Optimal Design of Solar Powered Fuzzy Control Irrigation System for Cultivation of Green Vegetable Plants in Rural India, in: *Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, 2012 1st International Conference on. IEEE, pp. 877–882.
- Smith, R.J., Baillie, J.N., McCarthy, A.C., Raine, S.R., Baillie, C.P., 2010. Review of Precision Irrigation Technologies and Their Application. NCEA Publication 1003017.
- Stenitzer, E., 1993. Monitoring Soil Moisture Regimes of Field Crops With Gypsum Blocks. *Theoretical and Applied Climatology* 48, 159–165.
- Stern, P.H., 1979. *Small Scale Irrigation. A Manual of Low-Cost Water Technology*. Intermediate Technology Publications Ltd., London.
- Stone, K.C., Smajstrla, A.G., Zazueta, F.S., 1985. Microcomputer-Based Data Acquisition System for Continuous Soil Water Potential Measurements, in: *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 44. pp. 49–53.
- Sugeno, M., 1985. *Industrial Applications of Fuzzy Control*. Elsevier Science Inc., New York.
- Taylor, S.A., Ashcroft, G.L., 1972. *Physical Edaphology: The Physics of Irrigated and Nonirrigated Soils*. W.H. Freeman, San Francisco, CA.
- Touati, F., Al-Hitmi, M., Benhmed, K., Tabish, R., 2013. A Fuzzy Logic Based

- Irrigation System Enhanced with Wireless Data Logging Applied to the State of Qatar. *Computers and Electronics in Agriculture* 98, 233–241.
- Umair, S.M., Usman, R., 2010. Automation of Irrigation System Using ANN based Controller. *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS* 10, 45–51.
- UNEP, 2006. UNEP Annual Report.
- Waugh, D.L., Corey, R.B., 1963. A Moisture Control Apparatus for Use in Short Term Uptake Studies¹. *Agronomy Journal* 55, 412.
- World Water Assessment Programme, 2009. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris.
- Zadeh, L.A., 1973. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3, 28–44.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338–353.
- Zazueta, F.S., Smajstrla, A.G., Clark, G.A., 2008. Irrigation System Controllers. *Agricultural and Biological Engineering Department, Institute of Food and Agriculture Science, University of Florida SSAGE*22, 1–11.
- Zhang, J., Zhao, Y., Wang, Y., Li, J., 2009. A Fuzzy Control Irrigation System for Cotton Field, in: Li, D., Chunjiang, Z. (Eds.), *IFIP International Federation for Information Processing, Computer and Computing Technologies in Agriculture II*, Volume 1. Springer, Boston, pp. 779–785.
- Zimmermann, H.J., 2001. *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*, 4th ed. Springer Science+Business Media, New York.
- Αρναουτάκης, Ν., 2002. Συνοπτικός Οδηγός Matlab-Simulink για το Μάθημα ΣΑΕ Ι. Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Βολογιαννίδης, Σ., 2006. Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές-Διδακτικές Σημειώσεις. Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών, ΤΕΙ Σερρών, Σέρρες.
- Γράβαλος, Ι., Ντιούδης, Π., Φιλίντας, Α., Κατέρης, Δ., Δημητριάδης, Χ., 2006. Συγκριτική Μελέτη Αισθητήρων Μέτρησης Εδαφικής Υγρασίας, in: *Πρακτικά 10ου Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Ελληνικής*

Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), 13-16 Δεκεμβρίου, Ξάνθη, Τόμος Β΄. pp. 837–844.

Κινγκ, Ρ.Ε., 2004. Ευφυής Έλεγχος. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1984. Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., 2004. Σημειώσεις Αρδεύσεων. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος.

Τζιμόπουλος, Χ., Παπαδόπουλος, Β., 2013. Ασαφής Λογική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Χαλκίδης, Η., 2005. Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Εφαρμογή της Προσεγγιστικής Θεωρίας στους Υπόγειους Υδροφορείς. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Abstract

Water is a scarce natural resource and its availability is one of the fundamental preconditions for life on Earth. One of the major consumers of water worldwide is irrigated agriculture. The need for sustainable water management in irrigated agriculture is continuously growing, involving new intelligent automatic control techniques that contribute to water conservation. In this MSc thesis the basic principles and practices of irrigation scheduling and the main ways of calculating evapotranspiration are being presented, particularly the reference evapotranspiration, according to the equation of Penman-Monteith. Additionally, both conventional and intelligent irrigation control systems are being presented, with particular emphasis on the basic principles of intelligent control theory with fuzzy logic and application examples of both types. The purpose of this MSc thesis is the study, design and simulation of a Mamdani type intelligent control system with fuzzy logic, using Simulink and MATLAB fuzzy logic toolbox, which consists of a feed-forward fuzzy PD controller, having error and error change as inputs and irrigation time as an output. Furthermore, using actual meteorological data, the crop evapotranspiration is calculated, the value of which is subtracted from the desired evaporation rate, calculating the error. The results confirm the effectiveness of the system as the irrigation time, thus the quantity of irrigation water, are precisely changing according to the daily value of crop evapotranspiration.

Keywords: Fuzzy logic, fuzzy controller, intelligent control, irrigation automation, Simulink, MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox, irrigation, evapotranspiration, water resource management, irrigation scheduling, surface irrigation.